

# 한국산 큰산개구리(*Rana uenoi*)와 참개구리(*Pelophylax nigromaculatus*)의 중금속 생물축적 비교

강진욱\* · 이대균\*\* · 이상철\*\*\* · 심민석\*\*\* · 배양섭\*\*\*\*†

\*(주)애일

\*\*인천대학교 생명·나노바이오공학과

\*\*\*생물자원환경연구소

\*\*\*\*인천대학교 생명과학부

## Comparison of heavy metal bioaccumulation in Korean *Rana uenoi* and *Pelophylax nigromaculatus*

Jin Wook Kang\* · Dae Gyun Lee\*\* · Sang Cheol Lee\*\*\* · Min Suk Shim\*\*\*\*† · Yang Seop Bae\*\*\*\*†

\*Aeil Inc. 14676, Korea

\*\*Department of Bioengineering and Nano-Bioengineering, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea

\*\*\*Bio-Resource and Environmental Center, Incheon National University, Incheon Republic of Korea

\*\*\*\*Division of Life Sciences, Incheon National University, Incheon, Republic of Korea

(Received : 21 April 2025, Revised : 12 May 2025, Accepted : 12 May 2025)

### 요약

본 연구는 큰산개구리(*Rana uenoi*)와 참개구리(*Pelophylax nigromaculatus*)의 간(liver)과 신장(kidney) 조직 내 중금속 축적 특성을 비교하고, SVL(Snout-Vent Length), 체중(Weight), 성별(Sex) 등의 생리적 요인 및 지역, 토양 중금속 농도 등이 중금속 축적에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 두 종의 총 40개체를, 강릉, 영월, 원주, 제주 등 네 지역에서 포획하였으며, 장기 내 중금속 농도를 분석하고, 생물축적계수(bioaccumulation factor, BAF)를 산출하였다. 통계적 분석과 함께 랜덤 포레스트 분석을 적용하여 주요 영향 요인을 파악하였다. 분석 결과, 큰산개구리는 간에서 구리와 카드뮴, 신장에서 카드뮴과 납의 축적이 두드러졌으며, 토양 중금속 농도가 주요한 영향을 미쳤다. 반면, 참개구리는 아연과 비소를 포함한 다양한 금속에서 고른 축적 경향을 보였고, SVL과 체중 등 생리적 요인의 영향이 크게 나타났다. BAF 분석에서는 두 종 간 조직별로 상이한 축적 특성이 확인되었으며, 간과 신장에서 모두 종별, 지역별 차이가 뚜렷하였다. 수질 분석에서는 아연을 제외한 모든 중금속이 불검출(Not Detected, N.D)되어 분석에서 제외되었고, 이 결과는 중금속 축적에 있어 수생환경보다는 토양 조건과 개체 특성이 더 중요한 요인으로 작용했을 수 있음을 나타낸다. 본 연구는 양서류를 활용한 종별 축적 특성 및 서식지 기반 환경 요인 분석을 통해, 향후 국지적 서식지 환경 내 중금속 위해성 평가에 기초 자료로 활용될 수 있다.

핵심용어 : 큰산개구리, 참개구리, 중금속 축적, 생물축적계수, 생물축적

### Abstract

This study compares the accumulation characteristics of heavy metals in the liver and kidney tissues of two frog species, *Rana uenoi* and *Pelophylax nigromaculatus*, and quantitatively evaluates the influence of physiological factors—snout-vent length (SVL), body weight, and sex—as well as regional and soil metal concentrations. A total of 40 individuals (20 per species) were collected from four regions in South Korea: Gangneung, Yeongwol, Wonju,

†Whom correspondence should be addressed.

Division of Life Sciences, Incheon National University

Department of Bioengineering and Nano-Bioengineering, Incheon National University

E-mail : msshim@inu.ac.kr, baey@inu.ac.kr

• Jin Wook Kang Aeil Inc./Team Manager(nggr3@naver.com)

• Dae Gyun Lee Incheon University, Korea/Master's degree candidate(lsq1623@inu.ac.kr)

• Sang Cheol Lee Bioresource and Environmental Center, Incheon, Korea/Ph.D.(3881103@hanmail.net)

• Min Suk Shim Incheon University, Korea/Professor(msshim@inu.ac.kr)

• Yang Seop Bae Incheon University, Korea/Professor(baey@inu.ac.kr)



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

and Jeju. Heavy metal concentrations in tissues were analyzed, and bioaccumulation factor (BAF) were calculated. In addition to statistical analyses, random forest regression was employed to identify key influencing variables. The results indicated that *Rana uenoi* exhibited pronounced accumulation of copper and cadmium in the liver and lead in the kidney, with soil metal concentrations showing a major influence. In contrast, *Pelophylax nigromaculatus* showed relatively uniform accumulation patterns across various metals, including zinc and arsenic, and was more strongly influenced by physiological traits such as SVL and body weight. BAF analysis revealed species-specific and organ-specific accumulation patterns, showing distinct differences between species and regions in both the liver and kidney. Water quality analysis revealed that all metals except zinc were not detected (N.D.) and were therefore excluded from the analysis. This result suggests that, in terms of metal accumulation, soil conditions and individual traits may have played a more influential role than the aquatic environment. This study provides foundational data for future site-specific environmental risk assessments of heavy metals using amphibian bioindicators.

Key words : *Rana uenoi*, *Pelophylax nigromaculatus*, heavy metal accumulation, bioaccumulation factor, bioaccumulation

## 1. 서론

최근 연구에 따르면, 인류 활동에 기인한 현재의 종 멸종 속도는 자연적인 멸종 속도를 훨씬 웃돌며, 일부 척추동물 군에서 수천 년에 걸쳐 일어났을 변화가 불과 한 세기 만에 발생하고 있다는 점을 보여준다(Ceballos et al., 2015). 이러한 전 지구적 생물다양성 위기의 흐름 속에서 양서류 개체군도 급격히 감소하고 있으며(Wake, 1991, Houlihan et al., 2000; Blaustein and Kiesecker, 2002), 다수의 양서류 개체군이 감소 추세에 있으며, 이들 중 상당수가 보전이 필요한 대상으로 간주되고 있다(Alford and Richards, 1999).

양서류는 복잡한 생활사, 이동성이 낮고, 높은 수분 투과성을 가진 피부를 지니고 있어 환경 변화에 민감하게 반응하는 생물군으로 알려져 있다(Gonzalez Mille et al., 2013). 이러한 생태적 또는 생리적 특성은 화학물질이 체내에 빠르게 축적되는 생물축적 현상을 촉진하며(Gurushankara et al., 2007), 이로 인해 양서류는 환경오염 평가에 효과적인 생물지표종(bioindicator)으로 널리 활용되고 있다(Marquis et al., 2009).

최근 국내에서는 양서류의 생리적 특성과 보전 전략에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 예를 들어, 정자 동결보존 기법을 통해 개체군의 유전적 다양성 보존 가능성을 모색한 연구가 수행되었으며(Lee et al., 2023), 멸종위기종인 맹꽁이(*Kaloula borealis*)를 대상으로 서울, 논산, 부산 등 세 지역 간 SVL 및 체중 차이를 분석한 사례도 보고되었다(An et al., 2020). 또한 성별에 따른 생리적 특성과 기후 환경의 상호작용을 살핀 연구(Kim et al., 2024), 중부 산림 지역에서 도롱뇽의 서식지 적합성을 지수화하여 평가한 사례(Ko and Koo, 2022) 등은 양서류의 보전 생물학적 이해를 높이는 데 기여하고 있다. 그러나 이들 연구는 대부분 생리 상태 또는 서식지 적합성에 중점을 두고 있어, 중금속 축적과 같은 환경오염 물질의 체내 영향에 대한 연구는 상대적으로 부족한 실정이다.

또한, 양서류는 수생 및 육상 환경을 모두 이용하는 생활사적 특성으로 인해 다양한 오염 요인에 동시에 노출되며, 자외선, 질소계 비료 등 복합인 환경 스트레스 요인에 민감

하게 반응할 수 있다. 이러한 특성은 종별, 서식 환경별로 서로 다른 민감도 차이로 나타날 수 있으며, 실제로 선행 연구에서는 자외선-B와 질산염 노출에 대해 태평양창개구리(*Hyla regilla*)와 긴발가락도롱뇽(*Ambystoma macrodactylum*) 이 상이한 생존 및 성장 반응을 보였다라는 결과가 보고된 바 있다(Hatch and Blaustein, 2003).

한편, 중금속은 지구상에 존재하는 물질이지만 인간활동(광산, 제련, 농업 등)에 의해 안정되지 않게 유출, 축적되어 인간, 생물, 환경 등에 다양한 부정적 영향을 미쳐 오염물질로 분류되고 있다(Yun et al., 2016; Yun et al., 2017; Son et al., 2023; Yun and Son, 2024). 특히 카드뮴은 낮은 농도에서도 생리적 반응을 유도할 수 있는 독성을 가지며, 유생기 카드뮴 노출이 생존율과 번데기를 저해하거나 성장 반응에 변화를 유발할 수 있다는 연구 결과도 보고된 바 있다(James and Little, 2003). 중금속은 체내에 흡수된 후 간과 신장 등 특정 기관에 선택적으로 축적되며, 이들 장기는 각각 해독과 배설을 담당하는 주요 기관으로 중금속의 체내 동태를 파악하는 데 중요한 생리적 지표로 활용된다(Tuberville et al., 2016).

국내의 경우, 아프리카발톱개구리(*Xenopus laevis*)를 이용한 카드뮴 축적 연구(Kim and Chung, 1995), 철서 지역에서 채집된 양서류의 중금속 함량 조사(Lee et al., 1991), 영산강 수계 황소개구리의 체내 중금속 분석(Lee and Ko, 2001), 서울 인근에 서식하는 어류 및 양서류의 중금속 축적 관련 연구(Lee, 1993) 등이 보고되었으나, 국내 양서류를 대상으로 한 조직별 축적 특성 및 종 간 비교연구는 여전히 미흡한 수준이다(Kang et al., 2024a).

따라서 본 연구에서는 국내에서 흔히 분포하며 서로 다른 환경에서 서식하는 큰산개구리와 참개구리를 대상으로, 간과 신장에서의 중금속 축적 특성을 비교함으로써 종 간의 생물학적 차이와 서식지 오염에 따른 생물축적 양상을 규명하고자 한다. 본 연구는 저자의 선행 연구(Kang et al., 2025a; 2025b)에서 수집한 동일한 데이터를 기반으로 하되, 두 종 간의 중금속 축적 특성을 비교 분석하는 새로운 목적하에 표와 해석을 재구성하였다.

## 2. 재료 및 방법

본 장의 내용은 저자의 선행 연구(Kang et al., 2024a; 2024b)에서 각각 큰산개구리와 참개구리를 대상으로 수행한 중금속 분석 실험과 동일한 방법을 바탕으로 하며, 두 종간 중금속 축적 특성 비교라는 새로운 목적에 따라 내용을 통합 및 요약하여 재구성하였다. 중복 서술을 최소화하기 위해 공통된 실험 절차는 축약하여 기술하였으며, 세부적인 실험 조건은 앞선 연구를 참조하였다.

### 2.1 연구범위 및 재료

조사는 강원도 강릉시 난곡동, 영월군 와석리, 원주시 귀래리 농경지, 제주도 제주시 구좌읍 덕천리 북오름 인근 습지 등 총 4개 지역에서 수행하였다(Table 1). 각 지역에서 큰산개구리와 참개구리를 각각 5개체씩 채집하여 총 40개체를 확보하였다. 포획은 2023년 5월부터 2024년 3월 사이 번식기 및 활동기에 맞춰 이루어졌으며, 큰산개구리의 경우 포획금지 야생동물로 지정되어 있어 강릉(제 2023-2호), 영월(제 2024-2호), 원주(제 2024-1호), 제주(제 2024-4호)로부터 야생동물 포획·채취허가증을 발급받아 포획을 수행하였다.

채집한 개체는 에탄올(95~100%)로 안락사시킨 후, 디지털 캘리퍼스(H500-20, Mitutoyo)를 사용해 체장(SVL)을 측정하고, 전자저울(W-500, WellDot, China)로 체중을 측정하였다. 성별은 생식혹 유무 또는 해부를 통해 판별하였다(Table 2). 본 연구는 인천대학교 동물실험윤리위원회의 승인(INU-ANIIM-2023-14)을 받아 수행되었다.

### 2.2 중금속 분석

#### 1) 토양 및 수질 분석

토양 시료는 각 지역 농경지 및 습지 인근에서 지표면

3~5cm를 제거한 후 채취하였으며, 수질 시료는 동일 지역 내 수역에서 멸균 채수병을 이용해 수집하였다. 토양 분석은 우리환경연구소에, 수질 분석은 산업공해연구소에 의뢰하여 각각 토양오염공정시험기준 및 수질오염공정시험기준에 따라 분석하였다. 전처리된 시료는 유도결합플라즈마 원자방출분광기(ICP-OES)를 이용하여 니켈, 구리, 아연, 비소, 카드뮴, 납 등의 농도를 측정하였다(Kim et al., 2020; Im et al., 2022).

#### 2) 큰산개구리와 참개구리의 분석

채집된 개체는 실험실에서 간과 신장을 적출한 후 초순수로 균질화하였다. 조직 시료는 왕수(HNO<sub>3</sub>:HCl=1:3)와 혼합하여 상온 예비반응 및 가열 전처리를 거쳐 완전 용해시켰으며, 최종 시료는 유도결합플라즈마 질량분석기(ICP-MS, iCAP Q, Thermo Scientific, USA)를 이용하여 분석하였다. 분석 항목은 간 및 신장에서 각각 니켈, 구리, 아연, 비소, 카드뮴, 납 등 총 6종의 중금속이다(Bacchi et al., 2022).

#### 3) 생물축적계수(Bioaccumulation Factor, BAF)

생물축적계수(Bioaccumulation Factor, BAF)는 개체 조직 내 중금속 농도를 동일 지역의 환경 시료(토양 또는 수질) 농도로 나누어 산정하였다. 계산식은 다음과 같다.

$$BAF = \frac{\text{생물체 내 물질 함량}(ug/g)}{\text{환경 내 물질 함량}(ug/g)}$$

BAF>1은 생물 내 농축이 발생했음을, BAF<1은 외부 농도 대비 축적 수준이 낮음을 의미한다(Simon et al., 2017).

#### 4) 자료 분석

통계 분석은 R(ver. 4.4.2)을 활용하였으며, 상관분석, 일

Table 1. Study sites, coordinates, and target species in each region

Site	Latitude	Longitude	Location	Species
Gangneung	37° 47'22"N	128° 53'00"E	Nangok-dong, Gangneung-si, Gangwon-do	<i>Rana uenoi</i> , <i>Pelophylax nigromaculatus</i>
Yeongwol	37° 07'21"N	128° 35'42"E	Waseok-ri, Gimsatgat-myeon, Yeongwol-gun, Gangwon-do	<i>Rana uenoi</i> , <i>Pelophylax nigromaculatus</i>
Wonju	37° 13'34"N	127° 51'04"E	Gwirae-ri, Gwirae-myeon, Wonju-si, Gangwon-do	<i>Rana uenoi</i> , <i>Pelophylax nigromaculatus</i>
Jeju	33° 29'28"N	126° 44'30"E	Deokcheon-ri, Gujwa-eup, Jeju-si, Jeju-do	<i>Rana uenoi</i> , <i>Pelophylax nigromaculatus</i>

Table 2. Morphological comparison of *Rana uenoi* and *Pelophylax nigromaculatus* by region

Site	Species	Number of frogs	SVL (mm)	Weight (g)	Sex (Female/Male)
Gangneung	<i>Rana uenoi</i>	n=5	60.96±9.84	18.79±10.37	2/3
	<i>Pelophylax nigromaculatus</i>	n=5	52.17±10.22	13.85±9.06	2/3
Yeongwol	<i>Rana uenoi</i>	n=5	68.75±8.04	28.14±10.70	1/4
	<i>Pelophylax nigromaculatus</i>	n=5	48.56±7.74	11.41±4.14	3/2
Wonju	<i>Rana uenoi</i>	n=5	59.52±2.25	17.35±2.86	0/5
	<i>Pelophylax nigromaculatus</i>	n=5	53.07±13.16	16.73±12.82	2/3
Jeju	<i>Rana uenoi</i>	n=5	48.27±3.60	9.55±2.23	0/5
	<i>Pelophylax nigromaculatus</i>	n=5	33.88±2.19	3.95±0.46	3/2

\*Values from individual species data reported in Kang et al. (2024a; 2024b), reorganized here for interspecific comparison.

원분산분석(One-way ANOVA), 다중 회귀분석(MLR), 랜덤 포레스트(Random Forest)를 수행하였다. 참개구리에서의 불검출(N.D) 값은 검출한계(LOD)의 1/2 값을 대입하거나 최대우도추정법(MLE)을 병행하여 처리하였다. 모든 분석에서 유의수준은  $p < 0.05$ 로 설정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 토양 및 수질 분석 결과

본 연구에 사용된 토양 중금속 농도는 저자의 선행 연구(Kang et al., 2024a; 2024b)를 바탕으로 요약하여 제시하였다. 아연의 평균 농도가 가장 높았고( $140.75 \pm 75.84$  mg/kg), 카드뮴은 가장 낮은 수준( $0.46 \pm 0.16$  mg/kg)을 나타냈다. 특히 제주 지역에서는 니켈( $57.90$  mg/kg), 구리

( $42.40$  mg/kg), 납( $14.10$  mg/kg)의 농도가 다른 지역보다 상대적으로 높게 나타났으나, 모든 항목은 토양환경보전법에 따른 오염 우려 기준 이하로 확인되어 비교적 안전한 수준으로 평가되었다.

수질 중금속 농도는 네 지역 모두에서 아연을 제외한 모든 항목이 불검출(Not Detected, N.D)로 나타나, 본 연구의 분석 항목에서는 제외하였다(Kang et al., 2024a; 2024b).

#### 3.2 중금속 분석 결과

큰산개구리와 참개구리의 간 및 신장 내 중금속 농도를 비교한 결과, 두 종 모두 간에서는 구리와 아연, 신장에서는 아연과 구리의 농도가 가장 높았고, 카드뮴과 비소는 상대적으로 낮은 축적 경향을 보였다.

중금속 축적 패턴은 선행연구(Kang et al. 2024a; 2024b)

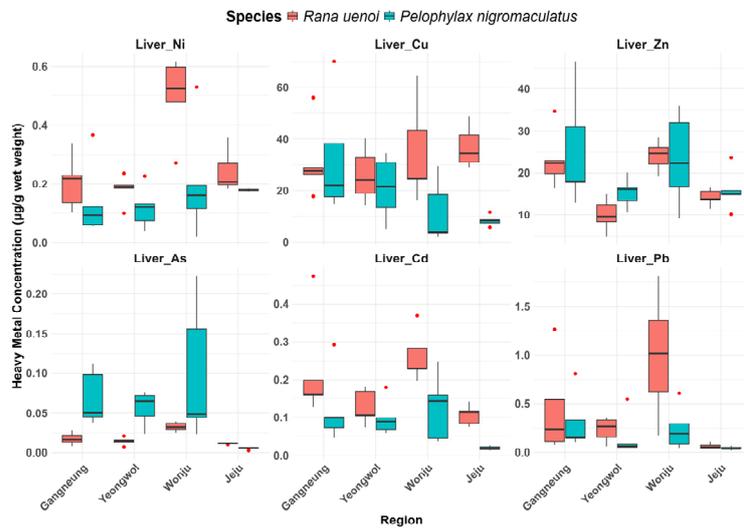


Fig. 1. Liver concentrations of heavy metals in *Rana uenoi* and *Pelophylax nigromaculatus* by region, reorganized for interspecific comparison (Kang et al., 2024a; 2024b).

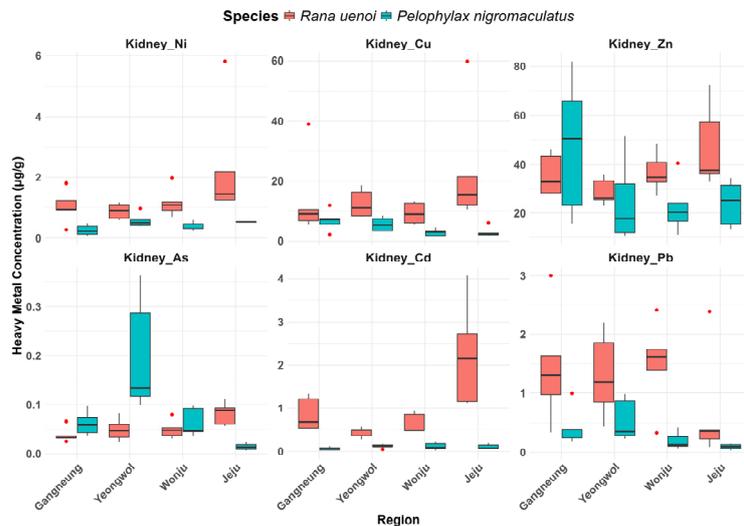


Fig. 2. Kidney concentrations of heavy metals in *Rana uenoi* and *Pelophylax nigromaculatus* by region, reorganized for interspecific comparison (Kang et al., 2024a; 2024b).

에서 보고된 데이터를 기반으로 재작성한 Fig. 1과 Fig. 2를 통해 종별 및 지역별로 시각적으로 비교할 수 있다.

본 연구에서는 저자의 선행 연구(Kang et al., 2024a; 2024b)에서 수행된 지역 및 개체 특성(SVL, 체중, 성별)과 조직 내 중금속 농도 간의 상관분석과는 달리, 토양 중금속 농도와 개구리 간 및 신장 내 중금속 농도 간의 상관관계를 중심으로 두 종 간 축적 특성 차이를 비교하였다. 분석 결과, 두 종 모두에서 특정 토양 중금속과 간 및 신장 내 중금속 간에 유의한 상관관계( $p < 0.05$ )가 확인되었으며, 이에 따라 유의한 상관관계를 나타내는 변수들만을 포함하여 평가를 수행하였다(Table 3).

큰산개구리와 참개구리 모두에서 토양 니켈과 간 내 비소, 카드뮴, 납은 유의한 음의 상관관계를 보였다. 이는 토양 니켈 농도가 증가할수록 간 내 해당 중금속의 축적이 감소하는 경향을 나타낸다. 그러나, 신장에서 토양 니켈과 니켈, 비소, 카드뮴 간의 유의미한 양의 상관관계는 큰산개구리에서만 확인되었으며, 참개구리에서는 이러한 관계가 나타나지 않았다. 이는 토양 니켈이 큰산개구리의 신장 내 특정 중금속 축적에 영향을 미칠 가능성이 있다.

또한, 큰산개구리는 토양 아연( $r = -0.734, p < 0.001$ ) 및 토양 비소( $r = -0.738, p < 0.001$ )와 간 내 아연 간에 매우 강한 음의 상관관계를 보였다. 이는, 토양 아연과 비소의 농도가 증가할수록, 간 내 아연 축적이 현저히 감소하는 경향을 의

미한다. 반면, 참개구리는 토양 아연과 신장 내 니켈( $r = 0.519, p = 0.019$ ) 및 비소( $r = 0.667, p = 0.001$ ) 간에 양의 상관관계를 나타내어, 토양 아연이 신장 내 특정 중금속 축적에 영향을 미칠 가능성이 확인되었다. 이처럼 큰산개구리는 토양 니켈, 참개구리는 토양 아연의 영향을 더 크게 받는 양상이 확인되었으며, 이는 두 종이 중금속을 축적하는 과정에서 노출 경로 또는 조직별 반응성의 차이에 의해 달라질 수 있음을 보여준다.

본 연구에서는 큰산개구리와 참개구리의 간 및 신장 내 중금속 농도와 생리적 특성(SVL, 체중, 성별), 지역 요인 간의 상관관계를 분석하여 종별 중금속 축적 양상의 차이를 비교하였다(Table 4). 두 종 모두에서 SVL과 체중 간에는 매우 강한 양의 상관관계가 확인되었으며, 이는 생물학적 성장 지표 간의 일관된 관계를 보여준다. 그러나 중금속 농도와 생리적 특성 간의 상관관계는 종에 따라 달랐으며, 이러한 경향은 앞선 선행 연구들(Kang et al., 2024a; 2024b)에서도 각각 보고된 바 있다. 특히 큰산개구리에서는 SVL이 증가할수록 신장 내 카드뮴 농도가 감소하는 경향이 나타났고(Kang et al., 2024a), 참개구리에서는 SVL과 체중이 증가할수록 신장 내 니켈 농도가 감소하는 양상이 확인되었다(Kang et al., 2024b). 간 조직에서는 두 종 모두 니켈과 아연 간에 양의 상관관계가 나타났지만, 참개구리에서 더 강한 상관성이 관찰되었으며, 큰산개구리에서는 니켈이 비소

Table 3. Significant ( $p < 0.05$ ) correlations between soil and tissue heavy metals in *Rana uenoi* and *Pelophylax nigromaculatus*

Variable Pair	<i>Rana uenoi</i>				Variable Pair	<i>Pelophylax nigromaculatus</i>			
	Tissue	Heavy metal	Correlation	p-value		Tissue	Heavy metal	Correlation	p-value
Soil - Ni	Liver	Zn	-0.512	0.021	Soil - Ni	Liver	As	-0.589	0.006
		As	-0.575	0.008			Cd	-0.571	0.009
		Cd	-0.549	0.012			Pb	-0.444	0.050
		Pb	-0.520	0.019					
	Kidney	Ni	0.483	0.031		Kidney	Ni	0.454	0.044
		As	0.641	0.002					
Soil - Cu	Liver	Zn	-0.565	0.009	Soil - Cu	Liver	As	-0.587	0.007
		As	-0.591	0.006			Cd	-0.565	0.009
		Cd	-0.573	0.008			Pb	-0.453	0.045
		Pb	-0.534	0.015			Kidney	Ni	0.454
	Ni	0.462	0.040						
	Kidney	As	0.633	0.003		Kidney	Ni	0.519	0.019
Cd		0.645	0.002	As	0.667		0.001		
Soil - Zn	Liver	Zn	-0.734	< 0.001	Soil - Zn	Kidney	Ni	0.519	0.019
Soil - As	Liver	Zn	-0.738	< 0.001	Soil - As	Kidney	As	0.667	0.001
						Kidney	Ni	0.529	0.016
Soil - Cd	Liver	Zn	-0.560	0.010	Soil - Cd	Kidney	As	0.658	0.002
						Kidney	As	0.658	0.002
	Kidney	As	0.528	0.017		Liver	Cu	-0.513	0.021
						Liver	Ni	0.608	0.004
Soil - Pb	Liver	Ni	0.491	0.028	Soil - Pb	Kidney	Cu	-0.460	0.041
						Kidney	Zn	-0.499	0.025
	Kidney	As	0.457	0.043		Liver	Cu	-0.585	0.007
						Liver	Cu	-0.609	0.004
Kidney	As	0.457	0.043	Kidney	Zn	-0.505	0.023		
				Kidney	Pb	-0.446	0.048		

및 납과도 동반 축적되는 경향이 확인되었다. 신장에서는 참개구리에서 비소와 납 간 강한 상관관계가 나타난 반면, 큰산개구리에서는 유의한 연관성이 확인되지 않았다.

지역 요인과의 관계에서도 차이가 나타났다. 큰산개구리는 영월 지역에서 간 내 아연 농도와 음의 상관관계를 보였고, 참개구리는 영월 지역에서 신장 내 비소와 양의 상관관계를 보였으며, 제주 지역에서는 신장 내 납 농도와 음의 상관관계가 나타났다. 성별 변수의 경우, 큰산개구리에서는 SVL과 체중이 성별과 유의한 상관관계를 보였고, 간 내 카드뮴과 신장 내 납에서도 성별 간 차이가 확인되었다. 반면, 참개구리에서는 성별과 중금속 간의 유의한 상관관계는 관

찰되지 않았다. 이러한 결과는 두 종이 동일한 환경 조건에서도 조직별 축적 특성에 차이를 보이는 것으로 나타났으며, 이는 생리적 구조, 대사 기작, 또는 노출 경로의 차이에 의해 설명될 수 있다.

토양 중금속 농도, 지역, 생리적 특성과 조직 내 중금속 농도 간의 상관관계 분석 결과, 일부 변수에서 통계적으로 유의한 연관성이 확인되었다. 이에 따라, 중금속 축적에 영향을 미치는 다양한 요인의 상호작용을 보다 정량적으로 분석하기 위해 두 가지 유형의 다중회귀모형을 구축하였다. 첫 번째 모델은 토양 중금속을 포함한 외부 환경 요인 중심으로 구성되었으며, 두 번째 모델은 토양 요인을 제외하고 지

Table 4. Significant ( $p < 0.05$ ) correlations between tissue heavy metals, biological factors, and regional characteristics in *Rana uenoi* and *Pelophylax nigromaculatus*

<i>Rana uenoi</i>				<i>Pelophylax nigromaculatus</i>			
Variable 1	Variable 2	Correlation	p-value	Variable 1	Variable 2	Correlation	p-value
SVL	Weight	0.961	< 0.001	SVL	Weight	0.959	< 0.001
	Sex	-0.700	0.001		Jeju	-0.665	0.001
	Yeongwol	0.573	0.008		Kidney_Ni	-0.590	0.006
	Jeju	-0.678	0.001	Weight	Jeju	-0.501	0.024
	Kidney_Cd	-0.540	0.014		Kidney_Ni	-0.500	0.025
Weight	Sex	-0.752	< 0.001	Gangneung	Liver_Cu	0.515	0.020
	Yeongwol	0.587	0.006		Kidney_Ni	-0.565	0.009
	Jeju	-0.540	0.014		Kidney_Cu	0.488	0.029
Sex	Liver_Cd	-0.449	0.047		Kidney_Zn	0.538	0.014
	Kidney_Pb	-0.468	0.037		Yeongwol	Kidney_As	0.748
Yeongwol	Liver_Zn	-0.632	0.003	Kidney_Pb		0.449	0.047
	Wonju	Liver_Ni	0.821	< 0.001		Wonju	Liver_As
Liver_Zn		0.501	0.024	Jeju	Liver_As		-0.555
Liver_As		0.822	< 0.001		Kidney_As	-0.459	0.042
Liver_Cd		0.477	0.033		Liver_Cd	-0.556	0.011
Jeju		Liver_Pb	0.642	0.002	Kidney_Pb	-0.450	0.046
	Liver_As	-0.463	0.040	Liver_Ni	Liver_Zn	0.645	0.002
	Kidney_Ni	0.529	0.017		Liver_As	0.491	0.028
	Liver_Ni	Kidney_Zn	0.505	0.023	Liver_Cu	Kidney_Cu	0.462
Kidney_As		0.643	0.002	Liver_Zn		Liver_As	0.748
Kidney_Cd		0.753	< 0.001		Liver_Cd	0.670	0.001
Liver_Zn	Liver_Zn	0.481	0.032		Liver_Pb	0.837	< 0.001
	Liver_As	0.589	0.006		Kidney_Pb	0.452	0.046
	Liver_Pb	0.614	0.004	Liver_Cd	0.541	0.014	
Liver_As	Liver_As	0.621	0.003	Liver_As	Liver_Pb	0.701	0.001
	Liver_Pb	0.533	0.016		Liver_Cd	Liver_Pb	0.716
Liver_Cd	Liver_Cd	0.594	0.006	Kidney_Pb		0.479	0.032
	Kidney_Ni	Liver_Pb	0.798	< 0.001	Liver_Pb	Kidney_Pb	0.691
Kidney_Pb		0.553	0.011	Kidney_Ni	Kidney_As	0.487	0.029
Kidney_Cu		0.885	< 0.001	Kidney_Cu	Kidney_Zn	0.587	0.006
Kidney_Cu	Kidney_Zn	0.852	< 0.001		Kidney_Cd	Kidney_Pb	0.787
	Kidney_As	0.692	0.001	Kidney_Zn	Kidney_As	0.702	0.001
	Kidney_Zn	0.757	< 0.001		Kidney_Cd	0.513	0.021
Kidney_Cu	Kidney_Pb	0.466	0.038				
	Kidney_Ni	0.487	0.029				
	Kidney_Zn	0.587	0.006				
Kidney_Zn	Kidney_Cd	0.513	0.021				

역 및 개체 생리적 특성만을 고려한 모델이다. 두 모델 모두에서 지역 변수는 자료 분석에서 기술한 바와 같이, 강릉을 기준으로 설정하였으며, 이를 통해 종별 축적 특성에 대한 변수별 상대적 기여도를 비교·분석하였다.

토양 기반 다중 회귀분석 결과(Table 5), 큰산개구리에서는 간 내 니켈, 아연, 비소, 카드뮴 등 4개, 신장 내 비소 1개 등 총 5개 중금속에서 7개 항목이 유의한 영향 요인이 확인되었으며( $p < 0.05$ ), 이 중 신장의 비소는 토양의 비소, 원주 지역, 성별 등 3개 요인에서 동시에 유의한 영향을 받은 것으로 나타났다. 전체적으로 SVL과 체중은 모든 회귀 결과에서 유의성을 보이지 않았다. 가장 높은 설명력을 보인 모델은 간 내 비소에서 대한 회귀식으로, 수정 결정계수 (Adjusted  $R^2$ )는 0.737이었다. 참개구리의 경우 간 내 아연, 비소, 납 등 3개, 신장의 니켈, 구리, 아연, 비소, 카드뮴, 납 등 6개를 포함한 총 9개의 중금속에서 24개 항목이 유의한 변수로 확인되었다. 이 중 간 내 납과 신장 내의 니켈과 비소는 각각 4개의 독립변수에서 유의한 영향을 받았다. 이 중 신장 내 비소는 토양 내 비소, SVL, 체중, 영월, 제주에서

유의성을 보이며 가장 높은 설명력을 나타냈고, 수정 결정계수는 0.739로 나타났다. 이러한 결과는 참개구리가 큰산개구리에 비해 더 많은 독립변수에 반응하며, 토양 중금속 및 생리적 요인이 중금속 축적에 미치는 영향 범위가 더 넓은 중임을 수치적으로 보여준다.

이어서, 토양 요인을 제외하고 지역 및 개체 생리적 특성을 독립변수로 설정한 회귀분석 결과(Table 6), 두 종 모두 간 및 신장 내 중금속 농도에 대해 지역 또는 생리적 특성에 따른 통계적으로 유의한 차이가 나타났다( $p < 0.05$ ). 큰산개구리는 총 7개의 항목에서 유의성이 나타났으며, 이 중 6개는 지역 변수, 1개는 성별 변수였다. SVL과 체중은 모든 중금속 항목에서 유의한 변수로 작용하지 않았고, 전체 회귀식의 설명력도 전반적으로 낮은 수준을 보였다. 그러나, 참개구리는 총 25개 항목에서 유의성이 확인되었으며, 그중 14개는 지역 변수, 6개는 SVL, 5개는 체중 항목에서 유의한 영향을 미쳤다. 특히 신장 내 납은 SVL, 체중, 원주, 제주 등 다수의 변수에서 동시에 유의한 영향을 받았으며, 해당 회귀식의 수정 결정계수는 0.611로 분석된 모든 항목 중 가장

Table 5. Summary of significant predictors from soil-based multiple regression analysis ( $p < 0.05$ )

Species	Heavy metal	Organ	Significant variable	Estimate	p-value	Adj $R^2$
<i>Rana ueno</i>	Ni	Liver	Wonju	0.342	0.001	0.679
	Zn	Liver	Jeju	-10.677	0.025	0.695
	Cd	Liver	Wonju	0.182	0.003	0.524
	As	Liver	Wonju	0.020	< 0.001	0.737
			Soil_As	0.009	0.032	0.431
			Sex	-0.095	0.038	0.431
			Wonju	0.033	0.048	0.431
<i>Pelophylax nigromaculatus</i>	Ni	Kidney	Soil_Ni	0.016	0.005	0.690
			SVL	-0.050	0.003	0.690
			Weight	0.046	0.011	0.690
			Jeju	-1.032	< 0.001	0.690
	Cu	Kidney	Wonju	-4.223	0.031	0.168
	Zn	Liver	Soil_Zn	-0.084	0.006	0.522
			SVL	-2.180	0.019	0.522
			Jeju	-28.385	0.002	0.522
		Kidney	Soil_Zn	-0.158	0.045	0.102
			Wonju	-28.123	0.038	0.102
	As	Liver	Jeju	-0.127	0.007	0.565
			Soil_As	0.016	0.003	0.739
			SVL	-0.021	0.002	0.739
Weight			0.022	0.005	0.739	
Jeju			-0.257	< 0.001	0.739	
Cd	Kidney	SVL	-0.014	0.031	0.249	
		Weight	0.018	0.017	0.249	
Pb	Liver	Soil_Pb	-0.048	0.026	0.551	
		SVL	-0.059	0.007	0.551	
		Weight	0.052	0.028	0.551	
		Jeju	-0.433	0.026	0.551	
	Kidney	SVL	-0.078	0.004	0.611	
		Weight	0.075	0.013	0.611	
		Jeju	-1.024	< 0.001	0.611	

높은 설명력을 보였다.

이러한 결과는, 토양 요인을 제외하더라도, 참개구리는 개체의 생리적 특성과 서식지 요인에 따라 조직 내 중금속 축적에 유의한 변화를 보이며, 큰산개구리에 비해 다양한 환경 요인에 더 민감하게 반응함을 수치적으로 보여준다.

랜덤 포레스트를 이용하여 간 및 신장 내 중금속 농도에 영향을 미치는 주요 요인을 평가하였으며, 지역, SVL, 체중, 성별을 독립변수로 설정하였고, 큰산개구리와 참개구리를 종별로 분석하였다.(Table 7).

본 연구에서는 선행연구(Kang et al., 2024a; 2024b)에서 변수 중요도를 상대적 비율(%)로 제시한 것과 달리, 기여도를 수치화한 실제 값으로 변수 중요도를 산정하고 이를 비교·분석하였다.

분석 결과, 큰개구리에서는 대부분의 중금속에서 지역이 가장 높은 중요도 값을 보였으며, 간 내 아연에서는 지역이 16.373으로 가장 높았고, 간 내 니켈에서도 지역이 14.353으로 높은 기여도를 나타냈다. 신장 내 카드뮴의 경우에도

지역이 11.932로 주요 변수로 작용하였다. 그러나, 성별은 대부분의 경우 상대적으로 낮은 중요도를 보였으며, 신장 내 납에서만 성별이 가장 높은 중요도를 나타냈다.

참개구리에서는 개체의 생리적 특성, 특히 SVL과 체중이 주요 변수로 나타나는 경향이 뚜렷하였다. 간 내 니켈에서는 SVL(11.185), 체중(10.514)이 높은 중요도를 보였으며, 지역은 0.019로 매우 낮았다. 간 내 비소에서도 SVL(11.693), 체중(10.747), 지역(9.567)이 모두 9 이상으로 높게 나타나 다양한 요인이 복합적으로 작용하고 있음을 보여주었다.

이러한 결과는, 큰산개구리에서는 지역적 요인이 영향력이 크고, 참개구리는 생리적 특성에 민감하게 반응한다는 중간 차이를 반영한다. 서식지 활용 방식의 차이와 생태적 특성이 중금속 축적 양상에 반영된 결과로 해석된다.

그 다음으로, 토양 중금속 농도를 독립변수로 설정한 랜덤 포레스트 분석 결과, 종별로 간 및 신장 내 중금속 축적에 영향을 미치는 요인이 다르게 나타났다(Table 8).

큰산개구리의 경우 간 내 니켈 축적에는 토양 납에서 가장

Table 6. Summary of significant predictors affecting heavy metal concentrations by species (p<0.05)

Species	Heavy metal	Organ	Significant variable	Estimate	p-value	Adj R <sup>2</sup>	
<i>Rana uenoi</i>	Ni	Liver	Wonju	0.344	0.001	0.679	
	Zn	Liver	Jeju	-14.086	0.002	0.695	
	As	Kidney	Liver	Wonju	0.020	0.001	0.737
			Sex	-0.095	0.038	0.431	
			Yeongwol	0.068	0.032	0.431	
		Wonju	0.043	0.034	0.431		
	Pb	Liver	Wonju	1.083	0.013	0.417	
<i>Pelophylax nigromaculatus</i>	Ni	Kidney	SVL	-0.050	0.003	0.690	
			Weight	0.046	0.011	0.690	
			Yeongwol	0.249	0.005	0.690	
	Cu	Kidney	Liver	Jeju	-38.367	0.034	0.260
			Wonju	-4.317	0.032	0.168	
	Zn	Liver	SVL	-2.180	0.019	0.522	
			Yeongwol	-14.372	0.006	0.522	
			Jeju	-32.610	0.001	0.522	
			Yeongwol	-26.957	0.045	0.102	
	As	Kidney	Wonju	-31.625	0.029	0.102	
			Liver	Jeju	-0.134	0.008	0.565
			SVL	-0.021	0.002	0.739	
	Cd	Kidney	Weight	0.022	0.005	0.739	
			Yeongwol	0.112	0.003	0.739	
			Jeju	-0.222	0.001	0.739	
Pb	Liver	SVL	-0.014	0.031	0.249		
		Weight	0.018	0.017	0.249		
		SVL	-0.059	0.007	0.551		
		Weight	0.052	0.028	0.551		
	Kidney	Yeongwol	-0.246	0.026	0.551		
		Jeju	-0.842	< 0.001	0.551		
		SVL	-0.078	0.004	0.611		
		Weight	0.075	0.013	0.611		
	Wonju	-0.388	0.010	0.611			
	Jeju	-1.062	< 0.001	0.611			

높은 중요도(14.352)를 보였으며, 이어서 토양 구리(9.109), 비소(9.070), 아연(8.903)도 상대적으로 높은 중요도를 보였다. 간 내 아연의 경우 토양 구리(9.996), 카드뮴(9.100), 비소(8.454)의 영향이 컸으며, 신장 내 카드뮴에서는 토양 구리(11.103), 카드뮴(10.138), 니켈(9.941)의 중요도가 두드러졌다. 또한 신장 내 비소는 토양 구리(9.209), 카드뮴(8.440), 니켈(6.966) 순으로 높은 영향을 받았다.

참개구리의 경우, 간 내 카드뮴 농도는 토양 니켈(7.392), 카드뮴(6.990), 구리(6.926)의 중요도가 높았으며, 간 내 비소 역시 토양 카드뮴(9.523), 구리(8.208), 니켈(7.847)이 주요 요인으로 나타났다. 신장 내 비소는 토양 아연(12.540), 비소(11.426), 구리(7.411) 등 다양한 금속의 복합적 영향을 받았으며, 신장 내 납에서는 토양 납(9.882), 카드뮴(6.150), 비소(5.933)의 중요도가 상대적으로 높았다.

이러한 결과는 큰산개구리의 경우 납, 구리, 카드뮴 등 특정 중금속의 영향을 집중적으로 받았으나, 참개구리는 다양한 토양 중금속들이 복합적으로 작용하는 특성이 있으며, 이는 종별 서식지 이용 형태 및 노출 경로의 차이에 기인한 것으로 판단된다.

**3.4 생물축적계수(Bioaccumulation factor, BAF)**

본 절에서는 저자의 선행 연구(Kang et al., 2024a; 2024b)에서 보고된 생물축적계수(BAF) 값을 바탕으로, 두 종 간 간 및 신장 조직 내 중금속 축적 양상을 시각적으로 비교하였다. 기존 수치를 동일한 기준에 따라 재정리한 그 래프(Fig. 3, Fig. 4)를 통해, 종별·지역별 중금속 축적 특성

의 차이를 직관적으로 제시하였다.

큰산개구리의 경우, 간 조직에서는 구리(강릉 6.407±2.954, 원주 6.116±3.404), 카드뮴(강릉 0.975±0.619), 납(강릉 0.080±0.088)의 축적 수준이 상대적으로 높게 나타났다. 신장 조직에서는 카드뮴이 강릉 3.736±1.656, 제주 3.743±2.046으로 특히 높았으며, 납 역시 강릉을 중심으로 높은 수치를 보였다.

참개구리의 경우, 간에서는 구리(강릉 6.655±4.652), 카드뮴(강릉 0.531±0.423), 비소(원주 0.023±0.020)가 상대적으로 높은 BAF를 보였다. 신장 조직에서는 구리(강릉 1.412±0.718), 아연(강릉 0.592±0.347)이 높게 나타났다.

이러한 결과는, 큰산개구리가 특정 금속(구리, 카드뮴, 납)에 대한 축적이 집중되는 양상을 보이는 반면, 참개구리는 다양한 금속에 대한 고른 축적 경향을 보였으며, 이는 종별 생리 특성, 대사 능력, 또는 지역별 중금속 노출 특성의 차이에 기인할 수 있다.

**4. 결론**

본 연구는 큰산개구리와 참개구리의 간 및 신장 조직에서 중금속의 축적 특성을 비교하고, 개체의 생리적 특성(SVL, 체중, 성별)과 환경 요인(지역, 토양 중금속 농도)이 축적에 미치는 영향을 통계 분석과 랜덤 포레스트를 통해 정량적으로 평가하였다.

두 종 모두 간과 신장에서 구리와 아연이 많이 축적되었으며, 비소와 카드뮴은 낮은 수준의 축적을 보였다. 큰산개구

Table 7. Variable importance for heavy metal concentrations in liver and kidney by species

Species	Heavy metal	Organ	Region	SVL	Weight	Sex
<i>Rana uenoi</i>	Ni	Liver	14.353	10.266	10.349	5.180
	Zn	Liver	16.373	1.407	1.424	-3.104
	As	Liver	13.490	3.455	9.860	4.589
	Cd	Kidney	11.932	4.677	5.505	-0.819
	Pb	Kidney	-0.372	-1.059	-1.553	8.631
<i>Pelophylax nigromaculatus</i>	Ni	Liver	0.019	11.185	10.514	-1.492
	As	Liver	9.567	11.693	10.747	2.191
	As	Kidney	12.733	0.083	0.311	0.690
	Zn	Liver	8.565	12.222	10.449	0.017

\*Variables with importance values of 10 or greater, or identified as key predictors, are presented.

Table 8. Key soil metal variables influencing tissue heavy metal accumulation by species

Species	Heavy metal	Organ	Variable 1	Importance 1	Variable 2	Importance 2	Variable 3	Importance 3
<i>Rana uenoi</i>	Ni	Liver	Soil_Pb	14.352	Soil_Cu	9.109	Soil_As	9.070
	Zn	Liver	Soil_Cu	9.996	Soil_Cd	9.100	Soil_As	8.454
	As	Liver	Soil_Pb	12.899	Soil_Zn	9.522	Soil_Ni	9.093
	As	Kidney	Soil_Cu	9.209	Soil_Cd	8.440	Soil_Ni	6.966
	Cd	Kidney	Soil_Cu	11.103	Soil_Cd	10.138	Soil_Ni	9.941
<i>Pelophylax nigromaculatus</i>	As	Liver	Soil_Cd	9.523	Soil_Cu	8.208	Soil_Ni	7.847
	Cd	Liver	Soil_Ni	7.392	Soil_Cd	6.990	Soil_Cu	6.926
	As	Kidney	Soil_Zn	12.540	Soil_As	11.426	Soil_Cu	7.411
	Pb	Kidney	Soil_Pb	9.882	Soil_Cd	6.150	Soil_As	5.933

\*Variables with importance values of 10 or greater, or identified as key predictors, are presented.

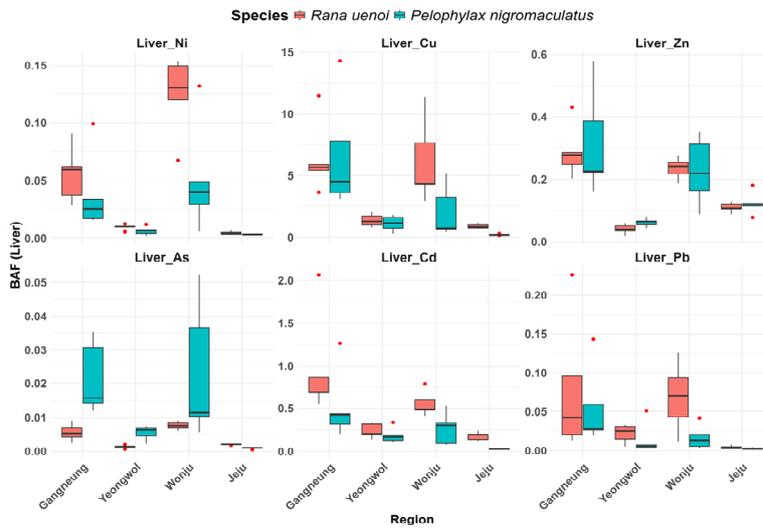


Fig. 3. Liver BAFs by Region and Species (Data from Kang et al., 2024a; 2024b)

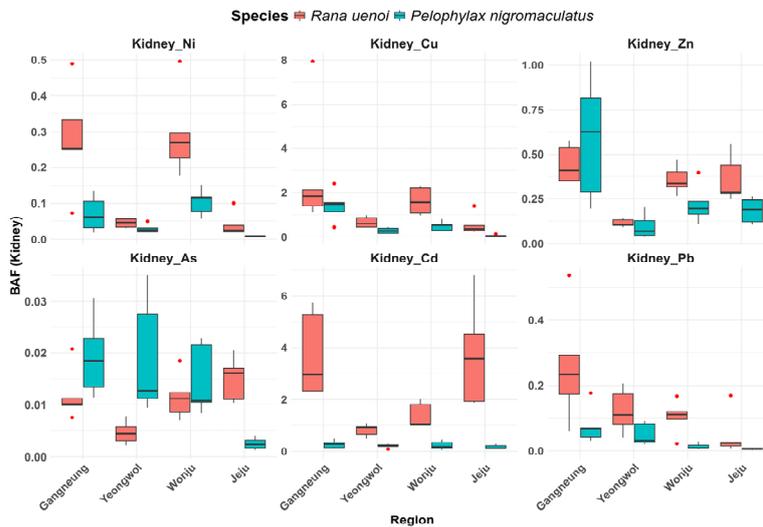


Fig. 4. Kidney BAFs by Region and Species (Data from Kang et al., 2024a; 2024b)

리는 원주 및 영월 지역에서 간 내 니켈, 비소, 납의 축적이, 강릉 및 제주 지역에서는 신장 내 카드뮴의 축적이 뚜렷하게 나타났다. 이와 달리, 참개구리는 강릉과 영월 지역에서 간 내 구리, 아연, 비소가 상대적으로 높게 축적되었다.

토양과 조직 간의 상관관계 분석에서는, 큰산개구리에서 토양 내 니켈 및 아연과 간 또는 신장 내 일부 중금속 축적 간 유의한 음의 상관관계가 확인되었고, 참개구리는 토양 아연과 신장 내 니켈 및 비소 축적 간에 양의 상관성을 보였다. 생리적 특성과의 관계에서는, 큰산개구리의 SVL이 증가할수록 신장 내 카드뮴 축적이 감소하였고, 성별은 간 내 카드뮴 및 신장 내 납 축적에 유의한 영향을 미쳤다. 참개구리는 SVL과 체중이 증가할수록 신장 내 니켈 축적이 낮아지는 경향을 보였으나, 성별에 따른 유의한 차이는 확인되지 않았다. 이러한 결과는 개체의 성장과 축적 간에 연관성을 보여주며, 향후 중금속이 성장에 미치는 영향을 규명할 필요가 있다.

다중 회귀 분석에서는, 큰산개구리의 간 내 니켈, 아연, 비소 축적에서 지역과 성별이 주요한 설명 변수로 작용하였으며, 신장 내 비소는 토양 비소, 지역, 성별의 복합적인 영향을 받는 것으로 나타났다. 참개구리는 간과 신장의 다양한 중금속 축적에 SVL, 체중, 지역이 모두 유의한 변수로 확인되었고, 특히 신장 내 비소 축적은 높은 설명력을 보였다 ( $Adj. R^2 = 0.739$ ).

랜덤 포레스트 분석에서는, 큰산개구리는 대부분의 중금속 축적에 지역이 가장 높은 변수 중요도를 나타냈고, 참개구리는 SVL과 체중이 주요 변수로 작용하였다. 토양 중금속을 독립변수로 설정한 모델에서는, 큰산개구리는 구리, 카드뮴, 납 등에서 일부 토양 요인의 영향이 뚜렷하게 나타났고, 참개구리는 다양한 토양 중금속이 복합적으로 작용하는 경향을 보였다. 이러한 결과는 토양 오염 수준뿐만 아니라 지질 특성과 같은 자연적 요인도 중금속 축적 경향에 영향을 미칠 수 있음을 나타내며, 이는 산업적 영향이 없는 지역에

서도 지질 특성에 따라 토양 중금속 농도가 달라질 수 있음을 보여준다(Yoon et al., 2009).

BAF 분석 결과, 큰산개구리는 간에서 구리와 카드뮴, 신장에서 카드뮴의 BAF가 특히 높게 나타났으며, 지역에 따라 특정 금속의 축적 경향이 뚜렷하게 구분되었다. 반면, 참개구리는 간에서 구리의 BAF가 일부 지역에서 높게 나타났으나, 전반적으로는 아연과 비소를 포함한 여러 중금속에서 비교적 고르게 분포된 BAF 값을 보였으며, 간과 신장 모두에서 다양한 금속이 동시에 축적되는 양상이 확인되었다. 이러한 차이는 두 종의 생리적 특성, 조직별 금속 대사 기작, 그리고 환경 노출 특성의 차이에 기인한 것으로 해석된다.

수질 분석에서는 아연을 제외한 모든 중금속이 불검출되어 통계 분석에서 제외되었으며, 이는 해당 지역의 수생환경보다는 토양 오염, 먹이원의 오염 상태 및 개체 특성이 중금속 축적에 더 큰 영향을 미쳤을 가능성을 보여준다. 선행 연구에서도 양서류의 주요 축적 경로로 섭식을 통한 생물축적이 물리적 흡수보다 중요하다고 보고되었다(Smalling et al., 2021).

이러한 결과는 두 종의 중금속 축적 특성이 생리적 특성과 환경 요인의 상호작용에 따라 다르게 나타날 수 있음을 보여주며, 큰산개구리는 지역과 같은 외부 환경 요인, 참개구리는 개체의 생리적 특성에 더 민감하게 반응하는 경향이 있음을 제시한다.

본 연구는 양서류를 활용한 중금속 오염 감시의 기초자료로서 의미가 있으며, 특히 영월(탄광)과 원주(석산)처럼 인위적 교란이 심한 지역에서는 토양 오염 저감과 서식지 복원을 위한 관리 전략 마련이 필요하다. 먹이망을 통한 간접 노출 가능성이 확인된 만큼, 생물 군집 전반을 아우르는 생태계 기반의 모니터링이 요구되며, 향후 환경영향평가나 생물다양성 보전 계획 수립 시, 양서류의 축적 특성을 반영한 실질적인 보호 방안도 함께 고려되어야 한다.

앞으로 다양한 생물종과 서식지에 대한 비교 연구, 그리고 중장기 모니터링이 병행된다면, 중금속 축적에 대한 양서류의 민감도 평가와 건강성 진단에 더욱 효과적으로 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구에 야생동물 포획 허가서를 허락해 준 강릉시, 영월군, 원주시, 제주시의 관계자와 많은 지원과 관심을 주신 (주) 애일의 이상기 소장님, 권순직 박사님, 한승필 이사님, 김강일 박사님에게 감사드리며, 인천대학교 동물분류학실 겸실의 Bayarsaikhan Ulziiyargal 박사님과 김한울 박사님, 김정호 선생님의 연구 조언에 진심으로 감사드립니다.

## References

Alford, R. A., and Richards, S. J. (1999). "Global amphibian declines: a problem in applied ecology." *Annu. Rev. Ecol. Syst.*, Vol. 30, pp. 133–165.

An, C. K., Hong, S. G., Na, S. M., Do, J. S., Oh, K. C. and Yi, H. B. (2020). "Comparison study of the snout-vent length (SVL) and the biomass for the climate change sensitive species, narrow-mouthed toads (*Kaloula borealis*, endangered species II), at the three different areas (Seoul, Nonsan, Busan) of South Korea." *J. Wetlands Res.*, Vol. 22(1), pp. 8–14.

Bacchi, E., Cammilleri, G., Tortorici, M., Galluzzo, F. G., Pantano, L., Calabrese, V., Vella, A., Macaluso, A., Lo Dico, G. M., Ferrantelli, V. and Brunone, M. (2022). "First report on the presence of toxic metals and metalloids in East Asian bullfrog (*Hoplobatrachus rugulosus*) legs" *Foods*, Vol. 11(19), 3009. <https://doi.org/10.3390/foods11193009>

Blaustein, A. R., and Kiesecker, J. M. (2002). "Complexity in conservation: lessons from the global decline of amphibian populations." *Ecol. Lett.*, Vol. 5, pp. 597–608.

Ceballos, G., Ehrlich, P. R., Barnosky, A. D., García, A., Pringle, R. M. and Palmer, T. M. (2015). "Accelerated modern human-induced species losses: Entering the sixth mass extinction" *Sci. Adv.*, Vol. 1, e1400253.

Gonzalez-Mille, D. J., Espinosa-Reyes, G., Rivero Pérez, N. E., Trejo-Acevedo, A., Nava-Montes, A. D. and Ilizaliturri-Hernández, C. A. (2013). "Persistent organochlorine pollutants (POPs) and DNA damage in giant toads (*Rhinella marina*) from an industrial area at Coatzacoalcos, Mexico." *Water Air Soil Pollut.*, Vol. 224, pp. 1781–1795.

Gurushankara, H. P., Krishnamurthy, S. V. and Vasudev, V. (2007). "Effect of malathion on survival, growth, and food consumption of Indian cricket frog (*Limnonectes limnocharis*) tadpoles." *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, Vol. 52, pp. 251–256.

Hatch, A. C., and Blaustein, A. R. (2003). "Combined effects of UV-B radiation and nitrate fertilizer on larval amphibians." *Ecol. Appl.*, Vol. 13, pp. 1083–1093.

Houlahan, J. E., Findlay, C. S., Schmidt, B. R., Meyer, A. H. and Kuzmin, S. L. (2000). "Quantitative evidence for global amphibian population declines." *Nature*, Vol. 404, pp. 752–755.

Im, J. K., Kim, Y. S., Cho, Y. C., Kang, T. and Kim, S. H. (2022). "Water quality, source identification, and risk assessment of heavy metals using multivariate analysis in the Han River watershed, South Korea" *Agronomy*, Vol. 12, 3111. <https://doi.org/10.3390/agronomy12123111>

James, S. M., and Little, E. E. (2003). "The effects of

- chronic cadmium exposure on American toad (*Bufo americanus*) tadpoles." *Environ. Toxicol. Chem.*, Vol. 22, pp. 377–380.
- Kang, J. W., Lee, D. G., Lee, S. C., Shim, M. S. and Bae, Y. S. (2025a). "Study on the Bioaccumulation of Korean *Rana uenoi*." *J. Wetlands Res.*, Vol. 27(1), pp. 80–89.
- Kang, J. W., Lee, D. G., Lee, S. C., Shim, M. S. and Bae, Y. S. (2025b). "Heavy Metal Bioaccumulation in Korean *Pelophylax nigromaculatus* (Hallowell, 1861)." *J. Environ. Sci. Int.*, Vol. 34(3), pp. 147–159.
- Kim, H., Lee, M., Lee, J.-H., Kim, K.-H., and Kim, K.-R. (2020). "Distribution and extent of heavy metal(loid) contamination in agricultural soils as affected by industrial activity." *Appl. Biol. Chem.*, 63,31. <https://doi.org/10.1186/s13765-020-00517-x>
- Kim, I. N., Do, M. S., Lee, S. C. and Bae, Y. S. (2024). "A study on the differences in body condition, size, and climate environment according to sex of *Kaloula borealis*." *J. Wetlands Res.*, Vol. 26(2), pp. 160–167.
- Kim, Y. K. and Chung, H. M. (1995). "Toxic effect of cadmium on the amphibian axis formation." *Environ. korean J. Toxicol.*, Vol. 11, pp. 37–42.
- Ko, K. Y., and Koo, B. H. (2022). "A study on the habitat suitability index (HSI) of '*Hynobius leechii*' in central forest area, Korea" *J. Wetlands Res.*, Vol. 24(4), pp. 213–223.
- Lee, D. P. (1993). "Residues of heavy metals in fish and frog sampled in Seoul and its vicinity" *Bulletin of the KACN ser.*, Vol. 12, pp. 151–156.
- Lee, D. P. and Ko, S. K. (2001). "The incidence of abnormalities in bullfrog, *Rana catesbeiana*, and their heavy metal accumulations in the Yeongsan River system." *Korean. J. Environ. Ecol.*, Vol. 15(2), pp. 153–158.
- Lee, H. W., Son, S. W., Lee, D. P., and Min, B. Y. (1991). "Concentration of heavy metals in amphibia collected from Chilseo area." *Inst. Environ. Res., Kyungnam Univ.*, Vol. 13, pp. 37–43.
- Lee, J. E., Park, J. K. and Do, Y. (2023). "Importance and application of amphibian sperm cryopreservation." *J. Wetlands Res.*, Vol. 25(4), pp. 257–266.
- Marquis, O., Miaud, C., Ficetola, G. F., Boscher, A., Mouchet, F., Guittonneau, S. and Devaux, A. (2009). "Variation in genotoxic stress tolerance among frog populations exposed to UV and pollutant gradients." *Aquat. Toxicol.*, Vol. 95, pp. 152–161.
- Shine, R. (1979). "Sexual selection and sexual dimorphism in the amphibia." *Copeia*, Vol. 1979, pp. 297–306.
- Simon, E., Braun, M., Tóthmérész, B. and Nagy, J. (2017). "Impact of anthropogenic activities on the concentration of trace elements in toe bones of the common toad (*Bufo bufo*) in Hungary" *North-West. J. Zool.*, Vol. 13(1), pp. 63–69.
- Smalling, K. L., Oja, E. B., Cleveland, D. M., Davenport, J. M., Eagles-Smith, C., Grant, E. H. C., Kleeman, P. M., Halstead, B. J., Stemp, K. M., Tornabene, B. J., Bunnell, Z. J. and Hossack, B. R. (2021). "Metal accumulation varies with life history, size, and development of larval amphibians" *Environ. Pollut.*, Vol. 287, 117638.
- Soil Environment Conservation Act, Act No. 4906, promulgated on January 5, 1995
- Son, J., Yun, S., Kwon, J., Shin, J., Kang, D., Park, M., and Lim, R. (2023). "A study on the evaluation of fertilizer loss in the drainage (waste) water of hydroponic cultivation, Korea." *J. Wetlands Res.*, Vol. 25, pp. 35–47.
- Tuberville, T. D., Scott, D. E., Metts, B. S., Finger, J. W. Jr. and Hamilton, M. T. (2016). "Hepatic and renal trace element concentrations in American alligators (*Alligator mississippiensis*) following chronic dietary exposure to coal fly ash contaminated prey." *Environ. Pollut.*, Vol. 214, pp. 400–408.
- Wake, D. B. (1991). "Declining amphibian populations." *Science*, Vol. 253, pp. 860–861.
- Yoon, J. K., Kim, D. H., Kim, T. S., Park, J. G., Chung, I. R., Kim, J. H. and Kim, H. (2009). "Evaluation on natural background of the soil heavy metals in Korea" *J. Soil Groundw. Environ.*, Vol. 14, pp. 32–39.
- Yun, S.-W., Baveye, P. C., Kim, K.-B., Kang, D.-H., Lee, S.-Y., Son, J., Kim, D.-H., Yoon, Y.-C. and Yu, C. (2016). "Effect of postmining land use on the spatial distribution of metal(loid)s and their transport in agricultural soils: Analysis of a case study of Chungyang, South Korea." *J. Geochem. Explor.*, Vol. 170, pp. 157–166.
- Yun, S. W., Kim, D. H., Kang, D. H., Lee, S. Y., Son, J. K., Kim, H. D., Yoon, Y. C. and Yu, C. (2017). "Spatial Distribution of Metal (loid) Contamination in Agricultural Soil as Affected by the Abandoned Mines: A Case Study of Buyeo County, South Korea." *J. Korean Soc. Agric. Eng.*, Vol. 59, pp. 51–60.
- Yun, S.-W. and Son, J. (2024). "Contamination and spatial distribution of metal(loid)s in the stream sediment near the greenhouse." *Horticultrae*, Vol. 10, 312. <https://doi.org/10.3390/horticultrae10040312>