

# 생태독성시험을 위한 국내 자생생물 후보 목록 도출: (1) 수서시험종

## Deriving Candidate List of Korean Native Organisms for Ecotoxicity Testing: (1) Aquatic Test Species

남선화 · 김민진 · 안윤주<sup>†</sup>

Sun-Hwa Nam · Minjin Kim · Youn-Joo An<sup>†</sup>

건국대학교 환경보건과학과

Department of Environmental Health Science, Konkuk University

(Received November 5, 2018; Revised December 26, 2018; Accepted January 10, 2019)

**Abstract** : Ecotoxicity data for ecological risk assessment were obtained according to test conditions presented in international standard test methods. However, only 25.8% of native organisms in Korea were included in international standard test methods. It is needed to consider native organisms in Korea as test species, in terms of toxicity sensitivity, domestic environment media, and economic costs. In this study, we collected taxonomic classification system (Kingdom animalia, plantae, protista), based on Phylum or Division and Class. We investigated the habitat and analyzed the presence or absence of international standard test methods and Korean native organisms. As for animalia, 26 of Class was derived from the fresh water as habitat. Eight and three of Class were derived from the each criteria 'not included in standard test methods and identifiable Korean native organisms' and 'not included in Korean native organisms in standard test methods and identifiable Korean native organisms'. With Korean native species list, taxonomic and ecological status, distribution, toxicity data, we verified the possibility of list for potential Korean native organisms (eleven of Class). This study proposes the candidate list of Korean native organisms to further develop ecotoxicity testing.

**Key Words** : Domestic Species, Ecotoxicity, Aquatic Toxicity, Native Organisms

**요약** : 생태위해성평가 시 활용하는 정량적인 생태독성자료는 국제적으로 신뢰성 있는 표준시험법에 제시된 세부 실험조건에 따라 수행되어야하나, 국제 생태독성 표준시험법 중 국내 서식종 비율은 단지 25.8%에 불과하다. 국외종 사용 시 생태계 교란 및 경제적 비용이 발생할 수 있으며, 국내종의 독성민감도 및 환경특성을 고려하여 국내 서식종을 활용할 필요가 있으나, 현재까지 국내 서식종에 대한 기초적인 생태독성실험방법 개발이 진행되고 있는 수준으로, 생태독성시험종으로서 국내 서식종을 고려한 심도있는 연구가 필요하다. 본 연구에서는 수서 생태독성을 위한 국내 자생생물 후보 목록을 도출하기 위해, 생물분류체계 내 담수 서식성, 국제적인 수서생태독성 표준시험법의 해당 여부, 국내 서식성을 중심으로 국내 자생 생태독성 후보종을 선별하였으며, 국내 생물종 목록, 분류학적·생태학적 위치, 분포성, 독성연구사례 여부를 바탕으로 국내 자생 생태독성 후보종의 특성 현황을 분석하여 최종적으로 수서 생태독성시험을 위한 잠재적인 국내 자생 생태독성 후보종 목록을 도출하였다. 이동성을 가진 동물계에 한해 담수 서식 생물분류군 26개 강을 추출하였으며, 동물계, 식물계, 원생생물계를 대상으로 국제적인 표준시험법의 수서 생태독성시험종으로서의 해당 여부를 확인하였고, 국제 수서 생태독성 표준시험법에 제시되지 않은 생물분류군 8개 강을 우선 선별하였다. 또한 국제 수서 생태독성 표준시험법에 제시되었으나 국내 자생생물이 포함되지 않은 생물분류군 3개 강을 차선 선별하였다. 그리고 국내 생물종 목록, 분류학적·생태학적 위치, 분포성, 독성사례 여부를 통해 11개 강 모두 잠재적인 수서 생태독성시험종으로서 가능성이 있는 것으로 파악되어, 최종적으로 동물계 6개 강(연감강, 소악강, 환대강, 이매패강, 와충강, 히드라충강), 식물계 4개 강(운조강, 물이끼강, 우산이끼강, 양치식물강), 원생생물계 1개 강(유글레나강)의 총 11개 강을 수서 생태독성시험을 위한 국내 자생생물 후보 목록으로 제안하였다.

**주제어** : 국내종, 생태독성, 수서독성, 자생생물

### 1. 서론

생태위해성평가 시 활용하는 정량적인 생태독성자료는 국제적으로 신뢰성 있는 표준시험법에 제시된 세부 실험조건에 따라 수행되어야하나,<sup>1)</sup> 국제 생태독성 표준시험법은 실험 용이성(예: 배양성, 번식성 등)에 초점을 맞춰 생태독성 시험종을 선정하므로 생태독성시험종으로서 권고 시험종 중

74.2%가 국외 서식종이다.<sup>2)</sup> 그러나 국내 서식종인 *Daphnia galeata*가 국외 서식종 *Daphnia magna*보다 독성 영향에 더 민감하다는 독성 민감도 비교 연구<sup>3)</sup>를 고려할 경우, 국내 환경을 대상으로 한 생태위해성평가 시 활용하는 정량적인 생태독성자료의 시험종은 국내 서식종을 활용할 필요가 있다. 또한 국내 서식종 이용 시, 국외 서식종을 수입하기 위한 경제적 비용을 절약할 수 있으며, 국외 서식종의 비의도

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: anyjoo@konkuk.ac.kr Tel: 02-2049-6090 Fax: 02-2201-3211

적인 환경 유출에 의한 생태계 교란을 미연에 방지할 수 있다<sup>4)</sup>

정부 및 학계의 참여로 생태독성시험종으로서 국내 서식종을 연구한 문헌 연구가 보고된 바 있으며,<sup>5-12)</sup> 실험 연구를 통해 현재까지 어류, 물벼룩류, 깔따구류, 새우류, 요각류, 양서류, 다슬기류 등 다양한 생물분류군에 해당하는 생태독성시험종이 제안된 바 있다.<sup>13-28)</sup> 그러나 해당 국내 서식종에 대한 기초적인 생태독성실험방법 개발 및 표준화 작업이 진행되고 있어, 국제적으로 신뢰성있는 표준시험법의 생태독성시험종으로서 국내 서식종의 도입이나 생태위해성평가 시 활용 가능한 국내 서식종의 시험물질별 정량적 생태독성자료 구축이 미약한 실정이다.

한편 어류, 물벼룩, 새우 등 일부 생물분류군에 편중된 독성시험종의 개발로 인해, 다양한 생물분류군에 해당하는 정량적 생태독성자료를 활용하는 확률론적 생태위해성평가에 제약이 있다. 생태독성자료 생성 시 기준이 되는 국제적 생태독성 표준시험법은 현재 11개 문(Phylum)의 18개 강(Class)에 해당하는 120종의 담수 생태독성시험종을 제시하고 있으나,<sup>2)</sup> 생태계 내 서식처를 통틀어 96개 문 271개 강<sup>29)</sup>에 해당하는 생물종의 분포성을 고려했을 때 다양한 생물분류군에 속하는 생태독성시험종에 대한 검토가 필요하다.

본 연구에서는 수서 생태독성을 위한 국내 자생생물 후보 목록을 도출하기 위해, 생물분류체계(동물계, 식물계, 원생생물계) 내 담수 서식성, 국제적인 수서생태독성 표준시험법의 해당 여부, 국내 서식성을 중심으로 국내 자생생물 후보를 선별하였으며, 국내 생물종 목록, 분류학적 생태학적 위치, 분포성, 독성사례 여부를 바탕으로 국내 자생생물 후보의 특성 현황을 분석하여 최종적으로 수서 생태독성시험을 위한 잠재적인 국내 자생생물 후보 목록을 도출하였다.

## 2. 연구 방법

수서 생태독성을 위한 국내 자생생물 후보 목록을 도출하기 위해, 국제적인 생물분류체계를 조사하였으며, 이 중 담수 서식매체(동물계에 한함), 국제적인 수서생태독성 표준시험법의 해당 여부, 국내 자생생물 유무를 검토하였다. 국제적인 생물분류체계(예: Kingdom, Phylum 또는 Division, Class)는 국가생물종목록<sup>30)</sup> 및 미국 통합분류학정보시스템(Integrated Taxonomic Information System, ITIS)<sup>29)</sup>을 활용하였으며, 동물계의 담수 서식매체 여부는 국가생물종지식정보시스템,<sup>31)</sup> 한반도생물자원포털<sup>32)</sup> 등의 생물종 관련 사이트를 활용하였다. 또한 추출된 담수산 생물분류군 중 국제적인 수서생태독성 표준시험법에 포함되지 않은 생물분류군을 우선 선별하였으며, 국제적인 수서생태독성 표준시험법에 제시되었으나 국내 자생생물이 포함되지 않은 생물분류군을 차선 선별하였다. 국제적인 수서생태독성 표준시험법은 경제협력개발기구(Organization for Economic Cooperation and Development, OECD),<sup>33-48)</sup> 미국재료시험협회(American

Society for Testing and Materials, ASTM),<sup>49-61)</sup> 국제표준화기구(International Organization for Standardization, ISO),<sup>62-80)</sup> 미국환경부(U.S. Environmental Protection Agency, USEPA)<sup>81-88)</sup>을 활용하였다. 국내 자생생물 유무는 국가생물종지식정보시스템,<sup>31)</sup> 한반도생물자원포털<sup>32)</sup> 등의 생물종 관련 사이트, 학술논문,<sup>2,13,14,16)</sup> 학위논문,<sup>15)</sup> 정부보고서<sup>17-27,30)</sup> 등의 참고문헌을 활용하였다.

한편 최종 도출된 수서 생태독성시험을 위한 국내 자생생물 후보의 특성 현황을 분석하기 위해, 국내 생물종 목록, 분류학적·생태학적 위치, 분포성, 독성사례 여부는 국가생물종지식정보시스템,<sup>31)</sup> 한반도생물자원포털<sup>32)</sup> 등의 생물종 관련 사이트, 학술논문,<sup>2,13,14,16)</sup> 학위논문,<sup>15)</sup> 정부보고서<sup>17-27,30)</sup> 등의 참고문헌을 활용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 생물분류체계 기반 수서 생태독성시험을 위한 국내 자생생물 후보 목록 도출

국가생물종목록<sup>30)</sup>의 생물분류체계에 따르면, 동물계(Kingdom Animalia), 식물계(Kingdom Plantae), 유색조식물계(Kingdom Chromista), 원생생물계(Kingdom Protista), 세균계(Kingdom Bacteria), 균계(Kingdom Fungi), 고세균계(Kingdom Archaea)의 7개 계(Kingdom)로 분류되며, 이 중 유색조식물계, 세균계, 균계, 고세균계는 제외하였다. 동물계, 식물계, 원생생물계 내 문(Phylum 또는 Division), 강(Class)의 세부 생물분류체계는 ITIS<sup>29)</sup>를 기준으로 분류하였으며, 4계의 생물분류군 중 동물계 34개 문 101개 강, 식물계 8개 문 42개 강, 원생생물계 6개 문 18개 강으로 확인되었다. 이 때 강을 기준으로 서식매체가 세부 생물분류군에 따라 상이한 동물계의 담수산은 26개 강으로 확인되었다(Table 1). 동물계 26개 강, 식물계 42개 강(Table 2), 원생생물계 18개 강(Table 3) 중 OECD,<sup>33-48)</sup> ASTM,<sup>49-61)</sup> ISO,<sup>62-80)</sup> USEPA<sup>81-88)</sup>의 국제적인 수서생태독성 표준시험법에 생태독성시험종으로서 포함되지 않으며, 국내 자생생물 목록이 확인 가능한 생물분류군은 동물계 3개 강(소악강, 환대강, 히드라충강), 식물계 4개 강(윤조강, 물이끼강, 우산이끼강, 양치식물강), 원생생물계 1개 강(유글레나강)으로 확인되었다. 또한 국제적인 수서생태독성 표준시험법에 생태독성시험종으로서 제시되었으나 국내 자생생물이 포함되지 않은 생물분류군은 동물계 4개 강(연갑강, 쌍선강, 이매패강, 와충강)으로 확인되었다. 단, 쌍선강은 회충, 요충, 간선충, 선미선충, 원선충, 참선충 등의 국내 자생생물이 확인되었으나, 유해생물을 포함하고 있으므로 제외하였다. 따라서 최종적으로 동물계 6개 강(연갑강, 소악강, 환대강, 이매패강, 와충강, 히드라충강), 식물계 4개 강(윤조강, 물이끼강, 우산이끼강, 양치식물강), 원생생물계 1개 강(유글레나강)의 총 11개 강을 수서 생태독성시험을 위한 국내 자생생물 후보 목록으로 도출하였다(Table 4, Fig. 1).

**Table 1.** List for potential Korean native organisms to develop aquatic ecotoxicity test based on taxonomic classification - Kingdom Animalia

Taxonomic classification			Standard of selection	
Phylum	Class	Habitat*	Existence of international standard test methods	
			Organization	Inclusion of Korean native species
Myxozoa	-	P	-	-
	Appendicularia	SW	-	-
	Asciacea	SW	-	-
	Thaliacea	SW	-	-
	Cephalaspidomorphi	SW	-	-
	Myxini	SW	-	-
	Pteraspidoromphi		Extinction	
	Chondrostei	SW	-	-
	Cladistei (=Cladistia)	SW	-	-
Chordata	Holostei	SW	-	-
	Teleostei	FW, SW	OECD, ASTM, ISO, USEPA	O
	Chondrichthyes	SW	-	-
	Coelacanthi	SW	-	-
	Dipnoi	FW	-	-
	Amphibia	FW	OECD, ASTM	O
	Aves	T, A	-	-
	Mammalia	SW, T	-	-
	Reptilia	FW, SW, T	-	-
	Asterozoa			
	Asterozoa	SW	-	-
	Ophiurozoa	SW	-	-
Echinodermata	Somasteroidea	Extinction	-	-
	Crinozoa	SW	-	-
	Echinozoa	SW	-	-
	Holothurozoa	SW	-	-
Hemichordata	Enteropneusta	SW	-	-
	Pterobranchia	SW	-	-
Xenacoelomorpha	Acoela	FW, SW, T, P	-	-
	Nemertodermatida	SW	-	-
Chaetognatha	Archisagittozoa	SW	-	-
	Sagittozoa	SW	-	-
	Arachnida	T	-	-
	Merostomata	SW	-	-
	Pycnogonida	SW	-	-
	Branchiopoda	FW	OECD, ASTM, ISO, USEPA	O
	Cephalocarida	SW	-	-
Arthropoda	Malacostraca	FW, SW, T	ASTM	X
	Maxillopoda	FW, SW	-	-
	Ostracoda	FW, SW	-	-
	Remipedia	SW	-	-
	Collembola	T	-	-

\* P: parasitic, SW: sea water, FW: fresh water, T: terrestrial, A: air

**Table 1.** List for potential Korean native organisms to develop aquatic ecotoxicity test based on taxonomic classification - Kingdom Animalia (continued)

Taxonomic classification			Standard of selection	
Phylum	Class	Habitat*	Existence of international standard test methods	
			Organization	Inclusion of Korean native species
Arthropoda (continued)	Diplura	T	-	-
	Insecta	FW, T, A	OECD, ASTM	O
	Protura	T	-	-
	Chilopoda	T	-	-
	Diplopoda	T	-	-
	Pauropoda	T	-	-
	Symphyla	T	-	-
Kinorhyncha	-	SW	-	-
Loricifera	-	SW	-	-
Nematoda	Chromadorea	FW, SW, T	ISO	X
	Dorylaimea	-	-	-
	Enoplea	FW, SW	-	-
Nematomorpha	-	FW, SW	-	-
Onychophora	Udeonycophora	T	-	-
Priapulida	-	SW	-	-
Tardigrada	Eutardigrada	FW, SW	-	-
	Heterotardigrada	SW, T	-	-
	Mesotardigrada	-	-	-
Annelida	Citellata	FW, SW, T	-	-
	Polychaeta	FW, SW	-	-
Brachiopoda	Craniata	SW	-	-
	Lingulata	-	-	-
	Rhynchonellata	SW	-	-
Bryozoa	Gymnolaemata	SW	-	-
	Phylactolaemata	FW, SW	-	-
	Stenolaemata	SW	-	-
Kamptozoa	Cyclophora	SW	-	-
	Entoprocta	FW, SW	-	-
Mollusca	Bivalvia	FW, SW	ASTM	X
	Caudofoveata	SW	-	-
	Cephalopoda	SW	-	-
	Gastropoda	FW, SW, T	OECD, ASTM	-
	Monoplacophora	SW	-	-
	Polyplacophora	SW	-	-
	Scaphopoda	SW	-	-
Solenogastres	SW	-	-	
Nemertea	Anopla	SW	-	-
	Enopla	SW	-	-
Phoronida	-	SW	-	-
Sipuncula	Phascolosomatidea	SW	-	-
	Sipunculidea	SW	-	-

\* SW: sea water, FW: fresh water, T: terrestrial, A: air.

**Table 1.** List for potential Korean native organisms to develop aquatic ecotoxicity test based on taxonomic classification - Kingdom Animalia (continued)

Taxonomic classification			Standard of selection	
Phylum	Class	Habitat	Existence of international standard test methods	
			Organization	Inclusion of Korean native species
Acanthocephala	Archiacanthocephala	P	-	-
	Eoacanthocephala	P	-	-
	Palaeacanthocephala	P	-	-
	Polyacanthocephala	-	-	-
Gastrotricha	-	FWS, SWS	-	-
Gnathostomulida	-	SW	-	-
Micrognathozoa	Micrognathozoa	-	-	-
Orthonectida	-	P	-	-
Platyhelminthes	Cestoda	P	-	-
	Trematoda	P	-	-
	Macrostomorpha	-	-	-
	Trepaxonemata (=Turbellaria)	FW	ASTM	X
Rhombozoa	-	P	-	-
Rotifera	Bdelloidea	FW	-	-
	Monogonta (=Monogononta)	FW, SW	ASTM	O
	Pararotatoria	-	-	-
Cnidaria	Anthozoa	SW	-	-
	Cubozoa	SW	-	-
	Hydrozoa	FW, SW	-	-
	Polypodiozoa	P	-	-
	Scyphozoa	SW	-	-
	Staurozoa	SW	-	-
	Malacosporea	P	-	-
	Myxosporea	P	-	-
Ctenophora	Nuda	SW	-	-
	Tentaculata	SW	-	-
Placozoa	-	SW	-	-
	Calcarea	SW	-	-
Porifera	Demospongiae	FW, SW	-	-
	Hexactinellida	SW	-	-
	Homoscleromorpha	SW	-	-

\* P: parasitic, SW: sea water, FW: fresh water, FWS: fresh water sediment, SWS: sea water sediment

**Table 2.** List for potential Korean native organisms to develop aquatic ecotoxicity test based on taxonomic classification - Kingdom Plantae

Taxonomic classification		Standard of selection		
Division	Class	Existence of international standard test methods		
		Organization	Inclusion of Korean native species	
Glaucophyta	Glaucoephyceae	-	-	
	Cyanidiophyceae	-	-	
	Bangiophyceae	-	-	
	Floriophyceae	-	-	
	Rhodophyta	Compsopogonophyceae	-	-
		Porphyridiophyceae	-	-
		Rhodellophyceae	-	-
		Stylonematophyceae	-	-
Chlorophyta	Chlorodendrophyceae	-	-	
	Chlorophyceae	OECD, ASTM, ISO, USEPA	O	
	Pedinophyceae	-	-	
	Trebouxiophyceae	ASTM	O	
	Ulvophyceae	-	-	
	Mamiellophyceae	-	-	
	Nephrophyceae	-	-	
	Pyramimonadophyceae	-	-	
Charophyta	Charophyceae	-	-	
	Chlorokybophyceae	-	-	
	Coleochaetophyceae	-	-	
	Conjugatophyceae	-	-	
	Klebsormidiophyceae	-	-	
	Mesostigmatophyceae	-	-	
Anthocerotophyta	Anthocerotopsida	-	-	
	Leioporocerotopsida	-	-	
Bryophyta	Andreaebryopsida	-	-	
	Andreaeopsida	-	-	
	Bryopsida	-	-	
	Oedipodiopsida	-	-	
	Polytrichopsida	-	-	
	Sphagnopsida	-	-	
	Takakiopsida	-	-	
	Tetraphidopsida	-	-	
Marchantiophyta	Haplomitriopsida	-	-	
	Jungermanniopsida	-	-	
	Marchantiopsida	-	-	
Tracheophyta	Lycopodiopsida	-	-	
	Polypodiopsida	-	-	
	Cycadopsida	-	-	
	Ginkgoopsida	-	-	
	Gnetopsida	-	-	
	Magnoliopsida	OECD, ASTM, ISO, USEPA	O	
Pinopsida	-	-		

**Table 3.** List for potential Korean native organisms to develop aquatic ecotoxicity test based on taxonomic classification - Kingdom Protista

Taxonomic classification		Standard of selection	
Phylum	Class	Existence of international standard test methods	
		Organization	Inclusion of Korean native species
Apicomplexa	Conoidasida	-	-
Ciliophora	Ciliata	-	-
Craspedophyta	Craspedophyceae	-	-
Euglenophycota	Euglenophyceae	-	-
Protozoa	Acantharia	-	-
	Acrasea	-	-
	Eumycetozoa	-	-
	Labyrinthulea	-	-
	Haplosporea	-	-
	Heliozoa	-	-
	Sporozoa	-	-
	Filosia	-	-
	Granuloreticulosea	-	-
	Lobosa	-	-
	Xenophyophorida	-	-
Sarcomastigophora	Opalinata	-	-
	Phytomastigophora	-	-
	Zoomastigophora	-	-

**Table 4.** Final list for potential Korean native organisms to develop aquatic ecotoxicity test based on domestic species, status in ecosystem, and prior ecotoxicity data

Taxonomic classification		Standard of selection			
Phylum or Division	Class	Domestic species		Status in ecosystem	Prior ecotoxicity data
		The No. of species	Potential species		
Arthropoda	Malacostraca	1,039	Shrimp	Consumer, prey for fish, and intake of organic matter	0
	Maxillopoda	954	Copepod	Consumer and prey for fish	0
Annelida	Citellata	229	Tubifex	Consumer and Prey for fish	0
Mollusca	Bivalvia	30	Clam	Consumer, filtration of water, and habitat for other organisms	0
Platyhelminthes	Trepaxonemata (=Turbellaria)	3	Planaria	Consumer	0
Cnidaria	Hydrozoa	3	Freshwater jellyfish	Consumer	0
Charophyta	Charophyceae	37	Mare's tail	Shelter for phytoplankton and control of eutrophication	0
Bryophyta	Sphagnopsida	20	Sphagnum	Producer and carbon fixation	0
Marchantiophyta	Marchantiopsida	26	Liverwort	Producer	0
Tracheophyta	Polypodiopsida	246	Floating watermoss	Adsorption and intake of metal ions, nitrogen fixation	0
Euglenophycota	Euglenophyceae	353	Euglena	Producer and consumer	0

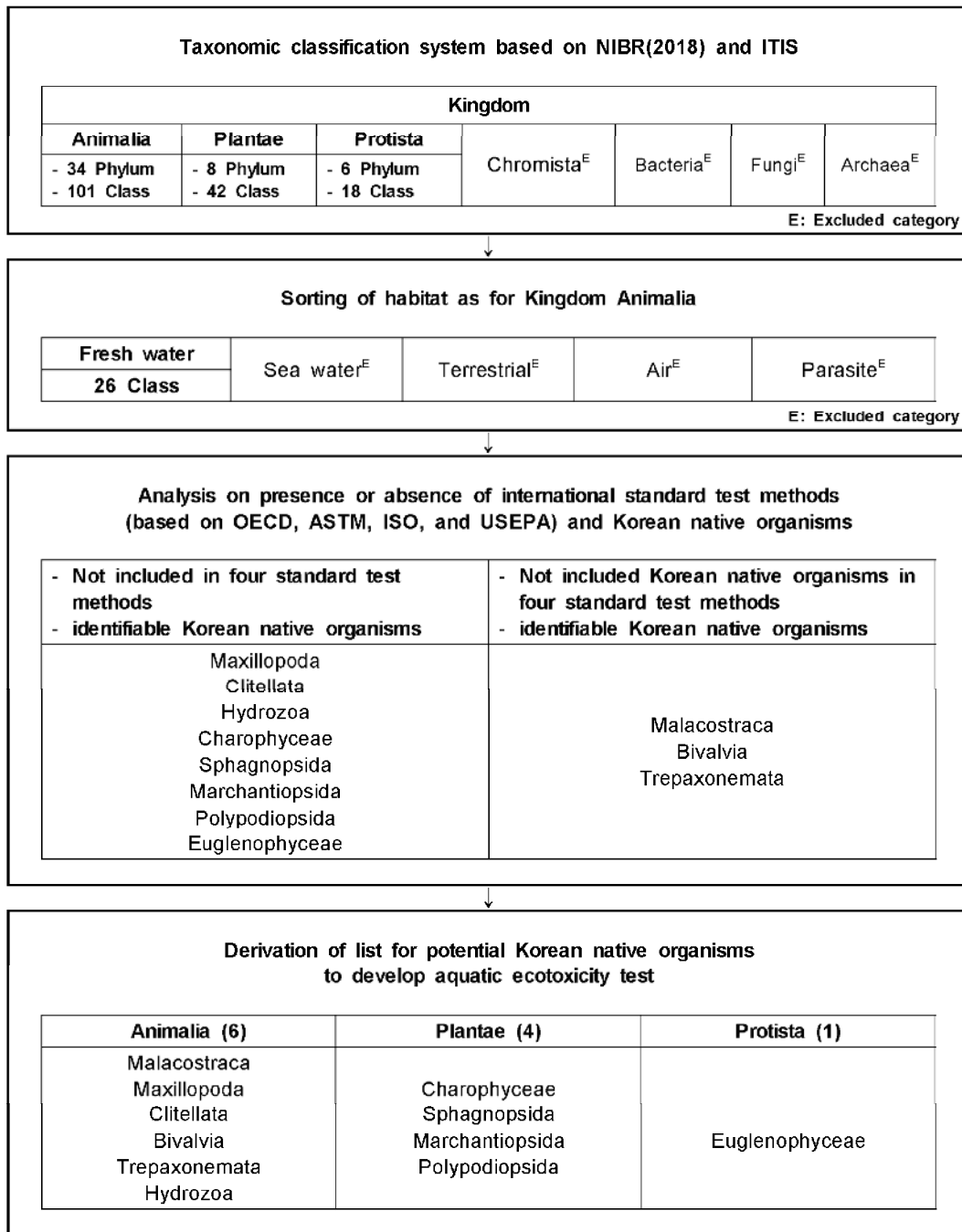


Fig. 1. Flow chart for deriving potential Korean native organisms to develop aquatic ecotoxicity test.

### 3.2. 수서 생태독성시험을 위한 국내 자생생물 후보의 특성 현황 분석

#### 3.2.1. 연갑강

연갑강은 수생생물 중 가재, 새우, 게 등을 포함하며, 기존 새우류 관련 표준시험법은 ASTM<sup>49)</sup>과 USEPA<sup>85)</sup>가 있다. 국내 자생하는 옆새우류는 *Gammarus gageoensis* (갈고리털옆새우), *G. galgosensis* (짧은털옆새우), *G. hoonsooi* (짧은꼬리다리옆새우), *G. kyonggiensis* (털보옆새우), *G. longisaeta* (긴털옆새우), *G. odaensis* (가시다리옆새우), *G. sobaegensis* (보통옆새우), *G. soyoensis* (민손옆새우), *G. wangbangensis*

(긴깃털옆새우), *G. zeongogensis* (칼세오리옆새우)의 10종으로 확인되었으며,<sup>30)</sup> *G. sobaegensis* (보통옆새우)의 니켈, 납, 카드뮴 영향이 평가된 바 있다.<sup>20)</sup> 옆새우류는 담수생태계 먹이사슬 중 중요한 위치를 차지하며, 소형 무척추동물과 사체 등의 유기물 섭취,<sup>89,90)</sup> 미생물 순환<sup>91,92)</sup> 등에 관여한다. 수명은 1-2년이며, 한 해에 여러 번 산란하여 한 번에 많은 새끼를 낳는다.

#### 3.2.2. 소약강

소약강은 요각류, 따개비 등을 포함하며, 국내 자생하는



요각류는 긴노요각목 158종, 검물벼룩목 156종, 갈고리노벼룩목 256종으로 보고되었다.<sup>30)</sup> 요각류 관련 생태독성연구는 *Mesocyclops leuckarti* (보통검물벼룩), *Eucyclops serrulatus* (툽니꼬리물벼룩), *Cyclops vernalis* (가시검물벼룩)의 치사, 성장, 형태변화 영향이 평가된 바 있다.<sup>92-94)</sup> 요각류의 수명은 2-6개월이며, 유성생식을 한다.<sup>92)</sup> 환경조건에 따라 다양한 세대(Egg → Nauplius → Copepodite → Adult)로 존재하며,<sup>92,95)</sup> 조류, 박테리아, 운충류 등을 섭취한다.<sup>95)</sup>

### 3.2.3. 환대강

환대강은 지렁이, 거머리가 포함되며, 담수 빈모류는 실지렁이목에 해당된다. 국내 자생하는 지렁이류는 *Lumbriculus variegatus*, *Tubifex tubifex*, *Limnodrilus hoffmeisteri*로 보고되었으며,<sup>30)</sup> 담수 환경에서 중금속에 대한 치사, 자가절단, 세포 내 과립 구성 영향,<sup>96)</sup> 체질 수 변화, 재생 영향이 보고된 바 있다.<sup>97)</sup> 대부분의 빈모류는 무성생식을 하며, 횡단면에 따라 머리와 꼬리 체절을 재생할 수 있다.<sup>98)</sup>

### 3.2.4. 이매패강

이매패강은 굴, 조개, 가리비, 홍합 등을 포함하며, 국내 자생하는 담수산 이매패류는 석패목 석패과 19종, 백합목 산골과 2종, 채첩과 9종의 총 30종으로 보고되었다.<sup>30)</sup> 이매패류 관련 생태독성연구는 치사, 성장, 행동, 여과성, 효소 활성 영향이 평가된 바 있으며,<sup>99-102)</sup> 국내 자생하지 않는 이매패류 관련 표준시험법이 제시되어 있다.<sup>60)</sup> 이매패류는 물여과, 양분 순환, 서식지 제공 등에 관여하며, 생식력이 높은 것으로 알려져 있다.<sup>102)</sup>

### 3.2.5. 와충강

와충강의 담수종은 플라나리아로 불리는 삼기장류이며,<sup>103)</sup> 국내 자생하는 플라나리아는 *Sphalloplana coreana* (장님 플라나리아), *Dugesia japonica* (플라나리아), *Phagocata vivida* (산골플라나리아) 3종으로 보고되었다.<sup>30)</sup> *Dugesia japonica*의 구리에 대한 치사, 항산화 영향이 보고된 바 있으며,<sup>104)</sup> 국내 자생하지 않는 플라나리아 관련 표준시험법이 제시되어 있다.<sup>49)</sup> 플라나리아류는 절단 후 거의 모든 신체 부위의 작은 조각으로부터 머리와 꼬리가 완전히 재생되며,<sup>105)</sup> 환경에 따라 무성생식(분열번식, 단위생식), 유성생식을 한다.<sup>106,107)</sup>

### 3.2.6. 히드라충강

히드라충강의 국내 자생하는 담수해파리는 *Craspedacusta sowerbii* (소위비꽃모자해파리), *Proboscoidactyla flavicirrata* (노란무늬지상해파리), *Proboscoidactyla stellata* (별무늬지상해파리) 3종으로 보고되었으며,<sup>30)</sup> 구리, 카드뮴 등에 대한 *Hydra oligactis*의 치사, 성장, 형태, 분화, 촉수 재생 영향이 평가된 바 있다.<sup>108-114)</sup> 해파리는 동물성 플랑크톤, 실지렁이류, 단각류, 모기유충, 물고기 알 등을 섭취하며,<sup>115)</sup> 저서성 폴립단계와 자유유영하는 해파리 단계가 있다.<sup>116)</sup>

### 3.2.7. 윤조강

윤조강의 국내 자생하는 쇠뜨기말과는 37종으로 보고되었으며,<sup>30)</sup> 중금속을 대상으로 성장, 색소함량, ATPase, 세포 감극 등의 영향이 평가된 바 있다.<sup>117-120)</sup> 쇠뜨기말류는 식물성 플랑크톤의 피난처 제공, 부영양화 억제 기능을 하며,<sup>121)</sup> 성숙한 장정기로부터 방출된 정자는 난원세포로 헤엄쳐 가난포자의 알세포와 결합하여 감수분열 후 발아되고 원사체로 자라 엽상체가 된다.<sup>122)</sup>

### 3.2.8. 물이끼강

물이끼강은 피트모스로 불리며,<sup>123)</sup> 국내 자생하는 물이끼목 물이끼과는 20종으로 보고되었다.<sup>30)</sup> *Sphagnum squarrosum* (비늘물이끼)의 엽록소, 단백질, 질소, 탄수화물, 프롤린, 효소 활성 영향이 평가된 바 있으며,<sup>124,125)</sup> 단성생식을 하는 물이끼류의 수그루는 흰색으로 분화된 가지의 장정기에 정자를 만들며, 암그루는 검은색의 포자낭이 있는 포자체가 있다.<sup>126)</sup> 포자는 원사체 단계에서 만들어져 발아하여 두 종류의 정단세포가 되고 원사체는 엽상체가 된다.<sup>123,127)</sup>

### 3.2.9. 우산이끼강

우산이끼강의 엷은잎우산대이끼 목 1종, 우산이끼목 25종으로 보고되었으며,<sup>30)</sup> 국내 자생하는 등근이끼과는 *Riccia fluitans* (물긴가지이끼), *Riccia glauca* (밭등근이끼), *Riccia glauca* var. *ciliaris* (털등근이끼), *Riccia huebeneriana* (아기밭등근이끼), *Riccia pseudofluitans* (물가등근이끼), *Riccia sorocarpa* (초록등근이끼), *Ricciocarpos natans* (은행이끼) 7종으로 보고되었다.<sup>30)</sup> 카드뮴에 대한 *Lunularia cruciata*의 성장, 무성아 발달 영향, 카드뮴에 대한 *Ricciocarpos natans* (은행이끼)의 엽록소와 항산화효소 활성 영향이 평가된 바 있다.<sup>128,129)</sup>

### 3.2.10. 양치식물강

양치식물강은 국내 자생하는 물고사리과, 생이가래과, 물부추과, 네가래과를 포함하며,<sup>130)</sup> 국내 자생하는 생이가래목은 *Azolla imbricata* (물개구리밥), *Marsilea quadrifolia* (네가래), *Salvinia natans* (생이가래) 3종으로 보고되었다.<sup>30)</sup> *Salvinia* sp.와 *Azolla* sp.의 성장, 광합성색소, 광계, 효소활성 영향이 평가된 바 있으며,<sup>131-136)</sup> 마디에 발달하는 한 쌍의 액아로부터 윤생하는 잎을 형성하며, 상부에 위치한 액아는 2장의 잎이 대생하여 광합성을 하는 부유엽으로 발달하고, 하부에 위치한 액아는 물에 잠기는 침수엽으로 엽록체가 없는 전혀 다른 형태의 가늘고 긴 뿌리의 기능을 한다.<sup>130,137-139)</sup>

### 3.2.11. 유글레나강

유글레나강은 광합성을 하는 진핵 단세포생물이며,<sup>140,141)</sup> 국내 자생하는 유글레나과는 236종으로 보고되었다.<sup>30)</sup> *Euglena gracilis*의 엽록소, 광합성률, 운동성, 유영속도, 세포모양, 효소활성, 세포 분열, DNA 분열 영향이 평가된 바 있으며,<sup>142-146)</sup> 무성생식을 한다.<sup>140)</sup>

## 4. 결론

본 연구에서는 수서 생태독성을 위한 국내 자생생물 후보 목록을 도출하기 위해, 생물분류체계(동물계, 식물계, 원생생물계)를 조사하였으며, 이동성을 가진 동물계에 한해 담수 서식 생물분류군 26개 강을 추출하였다. 또한 3개 계를 대상으로 국제적인 수서생태독성 표준시험법의 해당 여부를 확인하였고, 표준시험법에 제시되지 않은 생물분류군 8개 강을 우선 선별하였으며, 표준시험법에 제시되었으나 국내 자생생물이 포함되지 않은 생물분류군 4개 강을 차선 선별하였다. 이 때 유해생물을 다수 포함하고 있는 쌍선강을 제외하고, 최종적으로 동물계 6개 강(연갑강, 소약강, 환대강, 이매패강, 와충강, 히드라충강), 식물계 4개 강(유조강, 물이끼강, 우산이끼강, 양치식물강), 원생생물계 1개 강(유글레나강)의 총 11개 강을 수서 생태독성시험을 위한 국내 자생생물 후보 목록으로 도출하였다. 또한 국내 자생생물 후보의 특성 현황을 분석하기 위해, 국내 생물종 목록, 분류학적·생태학적 위치, 분포성, 독성사례 여부를 조사한 결과, 11개 강 모두 잠재적인 수서 생태독성시험종으로서 가능성이 있는 것으로 파악되었다. 단, 생태독성시험종의 배양성과 번식성은 실험실 조건에 따라 상이하므로, 이러한 국내 자생생물 후보에 대한 장기적인 후속 실험연구를 통해 실험용이성을 평가해야할 것으로 사료된다.

## Acknowledgement

본 연구는 정부(환경부)의 재원으로 국립생물자원관의 지원을 받아 수행하였음(NIBR201830201). This research was also supported by the Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Science, ICT and future planning (2016R1A2B3010445).



## References

- Klimisch, H. J., Andreae, M. and Tillmann, U., "A systematic approach for evaluating the quality of experimental toxicological and ecotoxicological data," *Regul. Toxicol. Pharmacol.*, **25**, 1~5(1997).
- Nam, S.-H. and An, Y.-J., "Investigation of Korean native organisms for development of ecotoxicity test: (1) Aquatic test species," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **40**(1), 34~47 (2018).
- Cui, R., Kwak, J. I. and An, Y.-J., "Characteristics and toxicity sensitivity of Korean dominant species daphnia galeata for ecotoxicity testing: Comparative study with *Daphnia magna*," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **38**(4), 193~200(2016).
- Lee, C. W., "Culture method of *Simocephalus mixtus* (S. mixtus) to evaluate environment toxicity and measurement method of environment toxicity by S. mixtus," (2003).
- Ministry of Environment and National Institute of Environmental Research, "Development of integrated methodology for evaluation of water environment III," (2006).
- Kim, S. W., Kwak, J. I., Yoon, J. Y., Jeong, S.-W. and An, Y.-J., "Selection of domestic test species suitable for Korean soil ecological risk assessment," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **36**(5), 359~366(2014).
- An, Y.-J., Nam, S.-H. and Lee, J.-K., "Domestic test species for aquatic toxicity assessment in Korea," *J. Korean Limnol.*, **40**(1), 1~13(2007).
- An, Y.-J., Nam, S.-H. and Lee, J.-K., "Fundamentals of ecotoxicity evaluation methods using domestic aquatic organisms in Korea: (II) Water flea," *J. Korean Limnol.*, **40**(3), 357~369(2007).
- An, Y.-J., Nam, S.-H. and Baek, Y.-W., "Fundamentals of ecotoxicity evaluation methods using domestic aquatic organisms in Korea: (III) Green algae," *J. Korean Limnol.*, **41**(2), 117~127(2008).
- Nam, S.-H., Yang, C.-Y., An, Y.-J. and Lee, J.-K., "Fundamentals of ecotoxicity evaluation methods using domestic aquatic organisms in Korea: (I) Fish," *J. Korean Limnol.*, **40**(2), 173~183(2007).
- Nam, S.-H. and An, Y.-J., "Investigation of Korean native organisms for development of ecotoxicity test: (2) Soil test species," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **40**(1), 48~57(2018).
- An, Y.-J., Kim, S. W., Moon, J., Jeong, S.-W., Kim, R.-Y., Yoon, J.-K. and Kim, T.-S., "An introductory research for development of soil ecological risk assessment in Korea," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **39**(6), 348~355(2017).
- Ko, S.-K., "A study on the evaluation of teratogenicity of chemical by Korean brown frog embryo, *Rana dybowskii*," *J. Korean Environ. Eco.*, **18**(3), 333~339(2004).
- Kim, E. J. and Lee, S.-K., "Use of duckweed (*Lemna gibba*) growth-inhibition test to evaluate the toxicity of chromate in Korea," *J. Korean Environ. Toxicol.*, **16**(4), 205~209(2001).
- Mo, H.-H., "Development of aquatic ecotoxicological test methods using Korean native indicator invertebrates," Thesis for the degree of doctor of philosophy, Korea university, (2011).
- Park, J.-H., Cho, D.-H. and Chung, K., "Ecotoxicological study of *Gammarus sobaegensis* by pH depression in artificial channels - Drift behavior -," *J. Korean Environ. Biol.*, **18**(1), 153~161(2000).
- Korea Environmental Industry Technology Institute, "Development of ecotoxicity test guideline and establishment of risk assessment for aquatic ecosystem with Korean amphibian embryos," (2011).
- Ministry of Environment, "Establishment toxicity assessment system and management of hazardous chemicals," (1999).
- Ministry of Environment, "Development of water quality criteria for aquatic life I," (2015).
- Ministry of Environment, "Development of water quality criteria for aquatic life III," (2017).

21. National Institute of Environmental Research (NIER), "Study on the Korean native organism for ecological toxicity evaluation," (2006).
22. National Institute of Environmental Research (NIER), "Development and standardization of ecotoxicity tests using species indigenous to Korea," (2007).
23. National Institute of Environmental Research (NIER), "Development and standardization of ecotoxicity tests using species indigenous to Korea II," (2008).
24. National Institute of Environmental Research (NIER), "Development and standardization of ecotoxicity tests using species indigenous to Korea III," (2009).
25. National Institute of Environmental Research (NIER), "Development and standardization of ecotoxicity tests using *Neocardina denticulata*," (2010).
26. National Institute of Environmental Research (NIER), "Studies on biological test system for environmental hazard assessment using indigenous species," (2011).
27. National Institute of Environmental Research (NIER), "Studies on plan for diversification of test species in ecotoxicity assessment 1," (2013).
28. National Institute of Environmental Research (NIER), "Development of water quality criteria for aquatic life II," (2016).
29. Integrated Taxonomic Information System (ITIS) Home Page, <https://www.itis.gov>, January (2017).
30. National Institute of Biological Resources (NIBR), "National list of species of Korea, 2017," (2018).
31. Nature Korea biodiversity information system Home Page, <http://www.nature.go.kr/index.jsp>, January (2017).
32. Species Korea Home Page, <https://www.nibr.go.kr/species/mobile/home/cls/cls010011.jsp>, January (2017).
33. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "TG No. 203. Fish, acute toxicity test," (1992).
34. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "TG No. 212. Fish, short-term toxicity test on embryo and sac-fry stages," (1998).
35. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "TG No. 215. Fish, juvenile growth test," (2000).
36. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "TG No. 202. *Daphnia* sp. acute immobilisation test," (2004).
37. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "TG No. 221. *Lemna* sp. growth inhibition test," (2006).
38. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "TG No. 230. 21-day fish assay," (2009).
39. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "TG No. 231. Amphibian metamorphosis assay," (2009).
40. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "TG No. 201. Freshwater alga and cyanobacteria, growth inhibition test," (2011).
41. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "TG No. 234. Fish sexual development test," (2011).
42. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "TG No. 235. *Chironomus* sp., acute immobilisation test," (2011).
43. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "TG No. 211. *Daphnia magna* reproduction test," (2012).
44. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "TG No. 229. Fish short term reproduction assay," (2012).
45. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "TG No. 210. Fish, early-life stage toxicity test," (2013).
46. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "TG No. 236. Fish embryo acute toxicity (FET) test," (2013).
47. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "TG No. 240. Medaka extended one generation reproduction test (MEOGRT)," (2015).
48. Organization for Economic Cooperation and Development (OECD), "TG No. 241. The larval amphibian growth and development assay (LAGDA)," (2015).
49. American Society for Testing and Materials (ASTM), "E729-96 Standard guide for conducting acute toxicity tests on test materials with fishes, macroinvertebrates, and amphibians," (1996).
50. American Society for Testing and Materials (ASTM), "E1415-91 Standard guide for conducting static toxicity tests with *Lemna gibba* G3," (1991).
51. American Society for Testing and Materials (ASTM), "E1440-91 Standard guide for acute toxicity test with the rotifer *Brachionus*," (1991).
52. American Society for Testing and Materials (ASTM), "E1768-95 Standard guide for ventilatory behavioral toxicology testing of freshwater fish," (1995).
53. American Society for Testing and Materials (ASTM), "E1192-97 Standard guide for conducting acute toxicity tests on aqueous ambient samples and effluents with fishes, macroinvertebrates, and amphibians," (1997).
54. American Society for Testing and Materials (ASTM), "E1193-97 Standard guide for conducting *daphnia magna* life-cycle toxicity tests," (1997).
55. American Society for Testing and Materials (ASTM), "E1295-01 Standard guide for conducting three-brood, renewal toxicity tests with *Ceriodaphnia dubia*," (2001).
56. American Society for Testing and Materials (ASTM), "E2172-01 Standard guide for conducting laboratory soil toxicity tests with the nematode *Caenorhabditis elegans*," (2001).
57. American Society for Testing and Materials (ASTM), "D3978-04 Standard practice for algal growth potential testing with *Pseudokirchneriella subcapitata*," (2004).
58. American Society for Testing and Materials (ASTM), "E1218-04 Standard guide for conducting static toxicity tests with microalgae," (2004).
59. American Society for Testing and Materials (ASTM), "E1241-05 Standard guide for conducting early life-stage toxicity tests with fishes," (2005).
60. American Society for Testing and Materials (ASTM), "E2455-06 Standard guide for conducting laboratory toxicity tests with

- freshwater mussels,” (2006).
61. American Society for Testing and Materials (ASTM), “E1439-12 Standard guide for conducting the frog embryo teratogenesis assay-xenopus (FETAX),” (2012).
  62. International Organization for Standardization (ISO), “ISO 10229 Water quality -- Determination of the prolonged toxicity of substances to freshwater fish -- Method for evaluating the effects of substances on the growth rate of rainbow trout (*Oncorhynchus mykiss* Walbaum (Teleostei, Salmonidae),” (1994).
  63. International Organization for Standardization (ISO), “ISO 10712 Water quality -- *Pseudomonas putida* growth inhibition test (*Pseudomonas* cell multiplication inhibition test),” (1995).
  64. International Organization for Standardization (ISO), “ISO 7346-1 Water quality -- Determination of the acute lethal toxicity of substances to a freshwater fish [Brachydanio rerio Hamilton-Buchanan (Teleostei, Cyprinidae)] -- Part 1: Static method,” (1996).
  65. International Organization for Standardization (ISO), “ISO 7346-2 Water quality -- Determination of the acute lethal toxicity of substances to a freshwater fish [Brachydanio rerio Hamilton-Buchanan (Teleostei, Cyprinidae)] -- Part 2: Semi-static method,” (1996).
  66. International Organization for Standardization (ISO), “ISO 7346-3 Water quality -- Determination of the acute lethal toxicity of substances to a freshwater fish [Brachydanio rerio Hamilton-Buchanan (Teleostei, Cyprinidae)] -- Part 3: Flow-through method,” (1996).
  67. International Organization for Standardization (ISO), “ISO 20079 Water quality -- Determination of the toxic effect of water constituents and waste water on duckweed (*Lemna minor*) -- Duckweed growth inhibition test,” (2005).
  68. International Organization for Standardization (ISO), “ISO 14442 Water quality -- Guidelines for algal growth inhibition tests with poorly soluble materials, volatile compounds, metals and waste water,” (2006).
  69. International Organization for Standardization (ISO), “ISO 15952 Soil quality -- Effects of pollutants on juvenile land snails (*Helicidae*) -- Determination of the effects on growth by soil contamination,” (2006).
  70. International Organization for Standardization (ISO), “ISO 15088 Water quality -- Determination of the acute toxicity of waste water to zebrafish eggs (*Danio rerio*),” (2007).
  71. International Organization for Standardization (ISO), “ISO 20665 Water quality -- Determination of chronic toxicity to *Ceriodaphnia dubia*,” (2008).
  72. International Organization for Standardization (ISO), “ISO 20666 Water quality -- Determination of the chronic toxicity to *Brachionus calyciflorus* in 48 h,” (2007).
  73. International Organization for Standardization (ISO), “ISO 12890 Water quality -- Determination of toxicity to embryos and larvae of freshwater fish -- Semi-static method,” (2009).
  74. International Organization for Standardization (ISO), “ISO 10872 Water quality -- Determination of the toxic effect of sediment and soil samples on growth, fertility and reproduction of *Caenorhabditis elegans* (Nematoda),” (2010).
  75. International Organization for Standardization (ISO), “ISO 14380 Water quality -- Determination of the acute toxicity to *Thamnocephalus platyurus* (Crustacea, Anostraca),” (2011).
  76. International Organization for Standardization (ISO), “ISO 6341 Water quality -- Determination of the inhibition of the mobility of *Daphnia magna* Straus (Cladocera, Crustacea) -- Acute toxicity test,” (2012).
  77. International Organization for Standardization (ISO), “ISO 8692 Water quality -- Fresh water algal growth inhibition test with unicellular green algae,” (2012).
  78. International Organization for Standardization (ISO), “ISO 14371 Water quality -- Determination of fresh water sediment toxicity to *Heterocypris incongruens* (Crustacea, Ostracoda),” (2012).
  79. International Organization for Standardization (ISO), “ISO 19827 Water quality -- Determination of the acute toxicity to the freshwater rotifer *Brachionus calyciflorus*,” (2016).
  80. ISO (International Organization for Standardization), 2017. ISO 20227 Water quality -- Determination of the growth inhibition effects of waste waters, natural waters and chemicals on the duckweed *Spirodela polyrhiza* -- Method using a stock culture independent microbiotest.
  81. United States Environmental Protection Agency (USEPA), “OCSP 850.4400 Aquatic Plant Toxicity Test Using *Lemna* spp.,” (2012).
  82. United States Environmental Protection Agency (USEPA), “OCSP 850.4500 Algal Toxicity,” (2012).
  83. United States Environmental Protection Agency (USEPA), “OCSP 850.4550 Cyanobacteria (*Anabaena flos-aquae*) Toxicity,” (2012).
  84. United States Environmental Protection Agency (USEPA), “OCSP 850.1010 Aquatic invertebrate acute toxicity test, freshwater Daphnids,”(2016a).
  85. United States Environmental Protection Agency (USEPA), “OCSP 850.1020 Gammarid amphipod acute toxicity test,”(2016b).
  86. United States Environmental Protection Agency (USEPA), “OCSP 850.1075 Freshwater and saltwater fish acute toxicity test,”(2016c).
  87. United States Environmental Protection Agency (USEPA), “OCSP 850.1300 *Daphnia* chronic toxicity test,”(2016d).
  88. United States Environmental Protection Agency (USEPA), “OCSP 850.1400 Fish early life stage toxicity test,”(2016e).
  89. Kelly, D. W., Dick, J. T. A. and Montgomery, I. W., “The functional role of *Gammarus* (Crustacea, Amphipoda): shredders, predators, or both?,” *Hydrobiol.*, **485**, 199~203(2002).
  90. Kim, H.-W., Joo, G.-J. and Choi, J.-H., “Leaf litter processing and patterns of shredder distribution in headwater streams in southeastern Korea,” *Korean J. Ecol. Sci.*, **19**, 529~541(1996).
  91. Hwang, J., Lee, S. J., Cho, K., Kim, Y.-G. and Bae, Y. J., “Survivorships of *Gammarus sobaegensis* (Amphipoda: Gammaridae) in different medium and temperature conditions,” *Korean J. Limnol.*, **39**, 413~41(2006).
  92. Kulkarni, D., Gergs, A., Hommen, U., Ratte, H. T. and Preuss, T. G., “A plea for the use of copepods in freshwater eco-

- toxicology," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **20**, 75~85(2013).
93. Yoon, K. and Kim, W., "Development and reproduction of *Eucyclops serrulatus* (Copepoda: Cyclopoida) in the laboratory culture," *Korean J. Limnol.*, **33**, 1~8(1999).
  94. Marus, E. M., Elphick, J. R. and Bailey, H. C., "A new toxicity test using the freshwater copepod *Cyclops vernalis*," *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, **95**, 357~362(2015).
  95. Sandercock, G. A. and Scudder, G. G. E., "An introduction and key to the freshwater calanoid copepods (Crustacea) of British Columbia," Department of Zoology University of British Columbia, (1994).
  96. Lobo, H., Méndez-Fernández, L., Martínez-Madrid, M., Daam, M. and Espíndola, E. L. G., "Acute toxicity of zinc and arsenic to the warmwater aquatic oligochaete *Branchiura sowerbyi* as compared to its coldwater counterpart *Tubifex tubifex* (Annelida, Clitellata)," *J. Soils Sedim.*, **16**, 2766~2774(2016).
  97. Lucan-Bouché, M.-L., Biagianti-Risbourg, S., Arsac, F. and Vernet, G., "An original decontamination process developed by the aquatic oligochaete *Tubifex tubifex* exposed to copper and lead," *Aquatic Toxicol.*, **45**, 9~17(1999).
  98. Martinez, V. G., Reddy, P. K. and Zoran, M. J., "Asexual reproduction and segmental regeneration, but not morphallaxis, are inhibited by boric acid in *Lumbriculus variegatus* (Annelida: Clitellata: Lumbriculidae)," *Hydrobiol.*, **564**, 73~86 (2006).
  99. Valenti, T. W., Cherry, D. S., Neves, R. J. and Schmerfeld, J., "Acute and chronic toxicity of mercury to early life stages of the rainbow mussel, *Villosa iris* (Bivalvia: Unionidae)," *Environ. Toxicol. Chem.*, **24**, 1242~1246(2005).
  100. Wang, N., Ingersoll, C. G., Ivey, C. D., Hardesty, D. K., May, T. W., Augspurger, T., Roberts, A. D., van Genderen, E. and Barnhart, M. C., "Sensitivity of early life stages of freshwater mussels (Unionidae) to acute and chronic toxicity of lead, cadmium, and zinc in water. 11," *Environ. Toxicol. Chem.*, **29**, 2053~2063(2010).
  101. Jorge, M. B., Loro, V. L., Bianchini, A., Wood, C. M. and Gillis, P. L., "Mortality, bioaccumulation and physiological responses in juvenile freshwater mussels (*Lampsilis siliquoides*) chronically exposed to copper," *Aquatic Toxicol.*, **126**, 137~147(2013).
  102. Buczek, S. B., Cope, W. G., Mclaughlin, R. A. and Kwak, T. J., "Acute toxicity of polyacrylamide flocculants to early life stages of freshwater mussels," *Environ. Toxicol. Chem.*, **36**, 2715~2721(2017).
  103. Schockaert, E. R., Hooge, M., Sluys, R., Schilling, S., Tyler, S. and Artois, T., "Global diversity of free living flatworms (Platyhelminthes, "Turbellaria") in freshwater," *Hydrobiol.*, **595**, 41~48(2008).
  104. Zhang, X., Zhang, B., Yi, H. and Zhao, B., "Mortality and antioxidant responses in the planarian (*Dugesia japonica*) after exposure to copper," *Toxicol. Ind. Health*, **30**, 123~131 (2014).
  105. Lin, Y.-S., Chu, C.-C., Lin, J.-J., Chang, C.-C., Wang, C.-C., Wan, C.-Y. and Tsui, P.-H., "Optical coherence tomography: A new strategy to image planarian regeneration," *Sci. Reports*, **4**, 6316(2014).
  106. Knakievicz, T., Vieira, S. M., Erdtmann, B. and Ferreira, H. B., "Reproductive modes and life cycles of freshwater planarians (Platyhelminthes, Tricladida, Paludicola) from southern Brazil," *Invertebrate Biol.*, **125**, 212~22(2006).
  107. Wu, J.-P. and Li, M.-H., "The use of freshwater planarians in environmental toxicology studies: Advantages and potential," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **161**, 45~56(2018).
  108. Slooff, W. and Canton, J. H., "Comparison of the susceptibility of 11 freshwater species to 8 chemical compounds. II. (semi)chronic toxicity tests," *Aquatic Toxicol.*, **4**, 271~282 (1983).
  109. Adams, J. A. and Haileselassie, H. M., "The effects of polychlorinated biphenyls (Aroclors 1016 and 1254) on mortality, reproduction, and regeneration in *Hydra oligactis*," *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, **13**, 493~499(1984).
  110. Herring, C. O., Adams, J. A., Wilson, B. A. and Pollard, S., "Dose-response studies using ethylene dibromide (EDB) in *Hydra Oligactis*," *Bull. Environ. Contam. Toxicol.*, **40**, 35~40(1988).
  111. Adams, J. A. and Kennedy, A. A., "Sublethal effects of ethylene dibromide on wound healing and morphogenesis in *Hydra oligactis*," *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, **22**, 272~277(1992).
  112. Fukuhori, N., Kitano, M. and Kimura, H., "Toxic effects of bisphenol a on sexual and asexual reproduction in *Hydra oligactis*," *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, **48**, 495~500 (2005).
  113. Kovacevic, G., Kalafatic, M. and Lubesic, N., "Effects of norflurazon on green and brown hydra," *Folia biol.*, **57**, 91~96(2009).
  114. Kim, B., "Biological responses to environmental chemicals in hydra, a cnidarian model." Thesis for the degree of master of philosophy, Gyeongsang National University, (2011).
  115. Spadinger, R. and Maier, G., "Prey selection and diel feeding of the freshwater jellyfish, *Craspedacusta sowerbyi*," *Freshwater Biol.*, **41**, 567~573(1999).
  116. Lewis, C., Migita, M., Hashimoto, H. and Collins, A. G., "On the occurrence of freshwater jellyfish in Japan 1928-2011: Eighty-three years of records of Mamizu kurage (Limnomedusae, Olindiidae)," *Proc. Biol. Soc. Washington*, **125**, 165~179(2012).
  117. Bibi, M. H., Asaeda, T. and Azim, E., "Effects of Cd, Cr, and Zn on growth and metal accumulation in an aquatic macrophyte, *Nitella graciliformis*," *Chem. Ecol.*, **26**, 49~56 (2010).
  118. Sooksawat, N., Meetam, M., Kruatrachue, M., Pokethitiyook, P. and Nathalang, K., "Phytoremediation potential of charophytes: Bioaccumulation and toxicity studies of cadmium, lead and zinc," *J. Environ. Sci.*, **25**, 596~604(2013).
  119. Rybak, M., Kołodziejczyk, A., Joniak, T., Ratajczak, I. and Gąbka, M., "Bioaccumulation and toxicity studies of macroalgae (Charophyceae) treated with aluminium: Experimental studies in the context of lake restoration," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **145**, 359~366(2017).
  120. Manusad-ianas, L., Maksimov, G., Darginavic-iene, J., Jur-

- koniene, S., Sadauskas, K. and Vitkus R., "Response of the charophyte *Nitellopsis obtusa* to heavy metals at the cellular, cell membrane and enzyme levels," *Environ. Toxicol.*, **17**, 275~283(2002).
121. Lambert, S. J. and Davy, A. J., "Water quality as a threat to aquatic plants; Discriminating between the effects of nitrate, phosphate, boron and heavy metals on charophytes," *New Phytologist.*, **198**, 1051~1059(2011).
122. Sato, M., Sakayama, H., Sato, Ma., Ito, M. and Sekimoto, H., "Characterization of sexual reproductive processes in *Chara braunii* (Charales, Charophyceae)," *Phycol. Res.*, **62**, 214~221(2014).
123. Shaw, A. J., Cox, C. J. and Boles, S. B., "Polarity of peat-moss (*Sphagnum*) evolution: who says bryophytes have no roots?" *American J. Bot.*, **90**, 1777~1787(2003).
124. Saxena, A., Saxena, D. K. and Srivastava, H. S., "The influence of glutathione on physiological effects of lead and its accumulation in moss *Sphagnum Squarrosum*," *Water Air Soil Pollut.*, **143**, 351~361(2003).
125. Saxena, A. and Saxena, A., "Bioaccumulation and glutathione-mediated detoxification of copper and cadmium in *Sphagnum squarrosum* Crome Samml," *Environ. Monit. Assess.*, **184**, 4097~4103(2012).
126. Johnson, M. G. and Shaw, A. J., "Genetic diversity, sexual condition, and microhabitat preference determine mating patterns in *Sphagnum* (Sphagnaceae) peat-mosses," *Biol. J. Linnean Soc.*, **115**, 96~113(2015).
127. Shaw, A. J., Cox, C. J., Buck, W. R., Devos, N., Buchanan, A.M., Cave, L., Seppelt, R., Shaw, B., Larrain, J., Andrus, R., Greilhuber, J. and Tensch, E. M., "Newly resolved relationships in an early land plant lineage Bryophyta class Sphagnopsida (peat mosses)," *Am. J. Botany.*, **97**, 1511~1531(2010).
128. Carginale, V., Sorbo, S., Capasso, C., Trinchella, F., Cafiero, G. and Basile, A., "Accumulation, localisation, and toxic effects of cadmium in the liverwort *Lunularia cruciata*," *Protoplasma*, **223**, 53~61(2004).
129. Oh, S. and Koh, S. C., "Chl a fluorescence characterization and biomarker selection from *Ricciocarpos natans* under cadmium stress" *J. Environ. Sci. Inter.*, **22**, 1403~1413(2013).
130. Seo, A. and Kim, I., "Development of the Trichomes in floating leaves of *Salvinia* species," *Korean J. Microscopy*, **38**(2), 117~124(2008).
131. Dhir, B., Sharmila, P., Saradhi, P. P., Sharma, S., Kumar, R. and Mehta, D., "Heavy metal induced physiological alterations in *Salvinia natans*," *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **74**, 1678~1684(2011).
132. Sánchez-Viveros, G., Ferrera-Cerrato, R. and Alarcón, A., "Short-term effects of arsenate-induced toxicity on growth, chlorophyll and carotenoid contents, and total content of phenolic compounds of *Azolla filiculoides*," *Water Air Soil Pollut.*, **217**, 455~462(2011).
133. Hu, C., Liu, X., Li, X. and Zhao, Y., "Evaluation of growth and biochemical indicators of *Salvinia natans* exposed to zinc oxide nanoparticles and zinc accumulation in plants," *Environ. Sci. Pollut. Res.*, **21**, 732~739(2014).
134. Rofkar, J. R., Dwyer, D. F. and Bobak, D. M., "Uptake and toxicity of arsenic, copper, and silicon in *Azolla caroliniana* and *Lemna minor*," *Int. J. Phytorem.*, **16**, 155~166(2014).
135. Park, T. S., Kim, C. S., Moon, B. C., Cho, J. R., Kang, C. K. and Kwon, O. D., "Research reports: Impact assessment of main herbicides to aquatic plants in paddy farming system of Korea," *Korean J. Weed Sci.*, **27**(2), 148~156(2007).
136. Jin, G., Koh, S. C. and Oh, S., "Chl a fluorescence analysis of five macrophytes exposed to cadmium," In proceedings of the Korean Environmental Sciences Society Conference, pp. 460~464(2007).
137. Estrella-Gómez, N., Mendoza-Cózatl, D., Moreno-Sánchez, R., González-Mendoza, D., Zapata-Pérez, O., Martínez-Hernández, A. and Santamaría, J. M., "The Pb-hyperaccumulator aquatic fern *Salvinia minima* Baker, responds to Pb<sup>2+</sup> by increasing phytochelatin synthesis via changes in SmPCS expression and in phytochelatin synthase activity," *Aquatic Toxicol.*, **91**, 320~328(2009).
138. Freitas, F., Lunardi, S., Souza, L. B., von der Osten, J. S. C., Arruda, R., andrade, R. L. T. and Battirola, L. D., "Accumulation of copper by the aquatic macrophyte *Salvinia biloba* Raddi (Salviniaceae)," *Braz. J. Biol.*, 133~139(2018).
139. An, Y.-J. and Kong, D.-S., "A study on the removal strategy of nutrients using *Salvinia natans*," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **17**(6), 593~603(1995).
140. Watanabe, M., Henmi, K., Ogawa, K. and Suzuki, T., "Cadmium-dependent generation of reactive oxygen species and mitochondrial DNA breaks in photosynthetic and non-photosynthetic strains of *Euglena gracilis*," *Comp. Biochem. Physiol. Part C*, **134**, 227~234(2003).
141. García-García, J. D., Rodríguez-Zavala, J. S., Jasso-Chávez, R., Mendoza-Cozatl, D. and Moreno-Sánchez, R., "Chromium uptake, retention and reduction in photosynthetic *Euglena gracilis*," *Arch. Microbiol.*, **191**, 431~440(2009).
142. Jakalski, J. L. and Khan, M. A. Q., "Photolysis of aldrin and dieldrin in a phytoplankton," *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, **24**, 75~77(1993).
143. Barque, J. P., Abahamid, A., Bourezgui, Y., Chacun, H. and Bonaly, J., "Growth responses of achlorophyllous *Euglena gracilis* to selected concentrations of cadmium and pentachlorophenol," *Arch. Environ. Contam. Toxicol.*, **28**, 8~12(1995).
144. Navarro, L., Torres-Márquez, M. E., González-Moreno, S., Devars, S., Hernández, R. and Moreno-Sánchez, R., "Comparison of physiological changes in *Euglena gracilis* during exposure to heavy metals of heterophic and autotrophic cells," *Comp. Biochem. and Physiol. Part C: Pharmacol. Toxicol. Endocrinol.*, **116**, 265~272(1997).
145. Rocchetta, I. and Küpper, H., "Chromium- and copper-induced inhibition of photosynthesis in *Euglena gracilis* analysed on the single-cell by fluorescence kinetic microscopy," *New Phytologist*, **181**, 405~420(2009).
146. Azizullah, A., Richter, P. and Häder, D.-P., "Comparative toxicity of the pesticides carbofuran and malathion to the freshwater flagellate *Euglena gracilis*," *Ecotoxicol.*, **20**, 1442~1454(2011).