KEI
Working
Paper
2025-06

# 하천 수생태계 건강성 예측모델 비교분석 연구

Comparative Study on Predictive Models for River Aquatic Ecosystem Health

최미경


KEI 한국환경연구원
Korea Environment Institute

**저 자** 최미경

**연구진**

연구책임자 최미경 (한국환경연구원 부연구위원)

**연구자문위원** (가나다 순)

강형식 (한국환경연구원 선임연구위원)
구경아 (한국환경연구원 연구위원)
김석현 (강원대학교 교수)
유경아 (국립환경과학원 연구관)





발행인 김 홍 균
발행처 한국환경연구원
(30147) 세종특별자치시 시청대로 370
세종국책연구단지 B동(과학·인프라동)
전화 044-415-7777 팩스 044-415-7799
www.kei.re.kr
발 행 2025년 5월 31일
등 록 제 2015-000009호 (1998년 1월 30일)
ISBN 979-11-5980-699-5 95530

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처를 표시해 주십시오.
최미경(2025), 「하천 수생태계 건강성 예측모델 비교분석 연구」, 한국환경연구원.

# 요 약


## 연구의 주요 내용

○ 본 연구에서는 국내외에서 개발·적용되는 수생태계 예측모델을 비교·분석하여 한계점과 개선 가능성을 도출하고 물환경 관리 정책의 의사결정을 지원하기 위한 방향을 제안하고자 함

○ 국내외 수생태계 예측모델을 5가지 유형으로 분류하고 대표적인 모델을 대상으로 개발 배경, 모의 방법, 입출력 자료, 활용 사례 등을 비교·검토하였음

- 종 출현 모델(RIVPACS)
- 종 분포 모델(MaxEnt, CLIMEX)
- 기계학습 기반 예측모델(회귀, 의사결정나무, 인공신경망 등)
- 물리 서식처 예측모델(PHABSIM, River2D, HABITAT)
- 먹이망 기반 생태모델(AQUATOX, EwE)

## 정책 제안

○ 정적모델(종 출현 모델, 종 분포 모델 등)과 동적모델(AQUATOX 등)의 모델 간 연계, 생태모델(종 출현 모델, 종 분포 모델 등)과 기계학습 기반 예측모델의 연계 등 모델 간 연계를 비롯하여 장단기 모니터링을 통한 모델 결과 검증, 시간 및 공간 영향을 추정할 수 있는 입력변수를 도입하여 기후변화나 교란에 따른 수생태계 영향 검토 기능 강화

○ 한국형 모델의 접근성과 모의성을 강화하는 통합 플랫폼을 구축하고, GUI나 GIS 기반 모델 구축 및 활용으로 사업에 대한 모델 활용 결과 제출 의무화 추진 필요

○ 한국형 모델 개발을 지속적으로 추진하고, 사업 진행 연구단 및 기관의 협력 강화를 통하여 모델링 기법 고도화 필요



주제어: 어류, 저서성대형무척추동물, 수생태계 예측모델, 기후변화, 인위적 교란

# 차 례

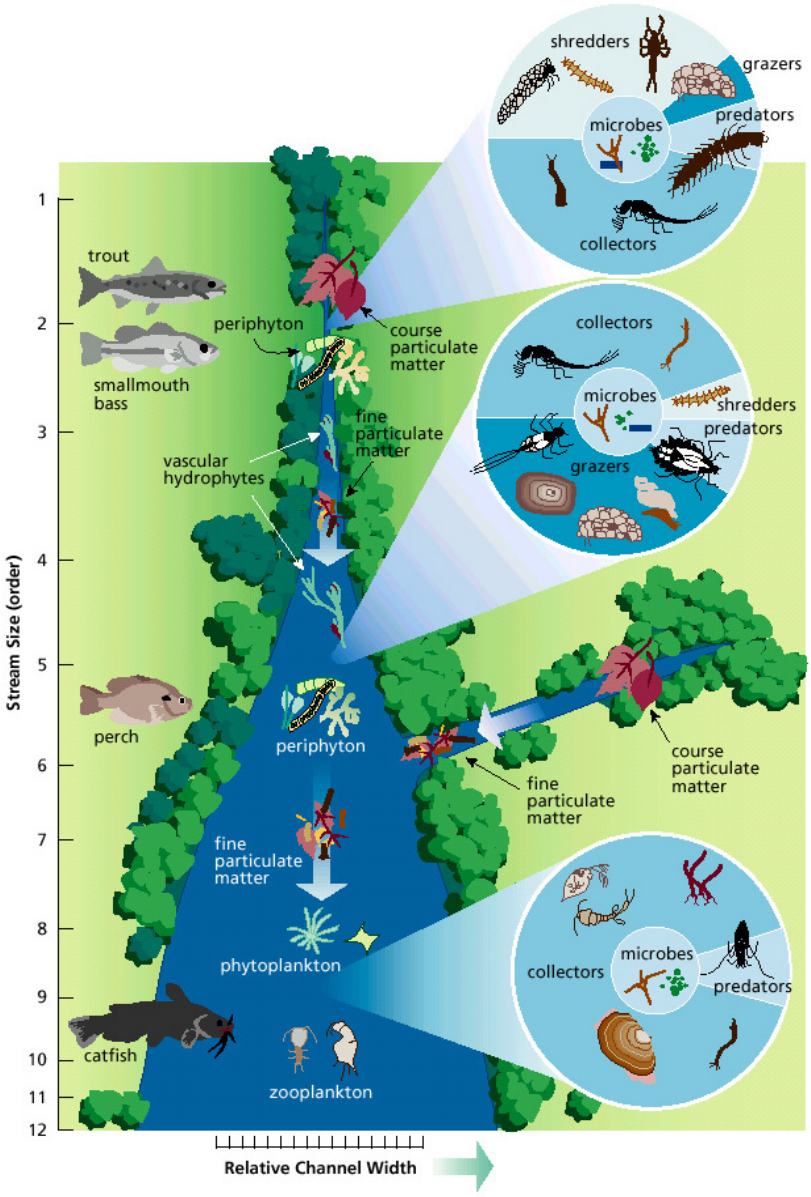
# Ⅰ 서 론

## 1. 연구 배경 및 필요성

○ 하천 연속성과 생태계 기능

- 하천은 오랜 기간 동안 물의 침식과 퇴적 작용이 반복되면서 형성된 다양한 지형을 포함하고 있는 자연의 역사적 산물로서, 발원지에서 하구에 이르기까지 지속적으로 변화하며 수로와 인근 지역이 끊임없이 상호작용하는 열린 생태계임
- 상류 지역은 경사가 급하고 유속이 빨라 침식작용이 우세한 반면, 하류로 갈수록 경사는 완만해지고 하상에 침전물이 축적되면서 입자가 미세하게 변하며 매우 넓고 비옥한 범람원(floodplain)과 삼각주(delta)가 형성됨
- 이러한 상류에서 하류로 이어지는 하천의 물리적 구조의 연속성은 하천 내 유기물 공급원의 변화와 생물 군집의 특성에도 직접적인 영향을 미침. 이러한 맥락에서 하천 연속성 개념(River Continuum Concept)[1]은 하천 시스템 내 물리적·생물학적 변화의 상호작용을 설명하는 핵심이론으로 활용되었음
- 하천 연속성 개념은 Vannote 등(1980)이 제안하고, 미국 FISWG(2001)에서 다룬 바 있으며, 온대지역 하천유역을 대상으로 한 연구 결과를 기반으로 함. 본 개념은 상류에서는 좁은 하폭과 급경사로 인하여 외부 기원 유기물(예: 낙엽, 토사 등)이 주를 이루며, 이러한 환경에서 해당 유기물을 섭취하는 분쇄자(shredders)가 우점함. 중류 구간에 이르면서 하폭은 넓어지고 유속이 완만해지면서 부착조류나 수생식물 등 하천 내부 생산(primary production)이 증가하며, 조류 및 유기물을 섭취하는 포식자(grazers)가 주된 군집을 형성함. 반면에 하류는 수심이 깊어지고 햇빛 투과가 제한되어 1차 생산량이 감소하고 상류에서 유입된 세립 유기물(fine particulate matter)에 의존하는 여과자(collectors)가 생물 군집의 주를 이룸(그림1-1 참조)

1) FISRWG(2001), p.1-31.



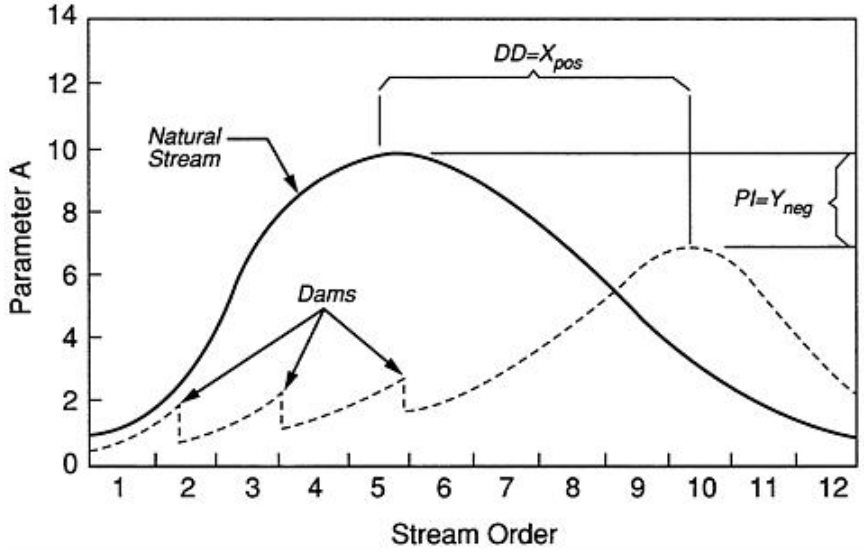

자료: FISRWG(2001), p.1-31.

〈그림 1-1〉 하천 연속성 개념(River Continuum Concept)

○ 하천 불연속성과 기후변화에 따른 수생태계 이해와 예측의 필요성

- 하천은 농업과 정주에 적합한 비옥한 충적토와 풍부한 수자원을 제공함으로써 인류 문명 발달에 핵심적인 기반이 되어옴. 특히 농경지에 용수를 공급하고, 홍수방어와 물자 이동이 가능하도록, 댐이나 보, 제방 등 다양한 수리시설 건설이 추진되었음
- 이러한 구조물은 하천의 물질 및 에너지 흐름을 단절시켜 하천 생태계의 연속성을 저해하게 됨. 이에 대하여 Ward와 Stanford(1983, 1995)는 하천 불연속성 개념(Serial

Discontinuity Concept)[2]을 제시하며, 특정 구조물에 따라 생물다양성과 유기물 흐름이 변화되고, 특정 지점(불연속 지점) 이후 하천 생물군집의 구성과 다양성이 현저히 달라진다는 것을 설명함. 이 개념은 하천 분단화(fragmentation)가 특정 생물군집(prameter A: 개체군 다양성, 생산량 등)에 부정적인 영향을 미친다는 것을 보여줌(그림 1-2 참조)




주: 불연속 거리(DD)는 조절에 따라 주어진 거리(x)에 대한 매개변수의 하류(긍정적인) 또는 상류(부정적인) 이동을 나타내며, 불연속 거리(PI)는 매개변수(A, 생물다양성이나 개체군 등)의 강도 차이를 나타냄.

자료: Ward and Stanford(1983). p.38.

〈그림 1-2〉 하천 불연속성 개념(Serial Discontinuity Concept)

- 국내 대부분의 하천은 댐이나 보와 같은 횡단구조물과 제방으로 인한 하도의 직강화로 인하여 하천의 불연속성이 높으며, 유량 안정화, 유사량 저감 등과 같이 자연적 교란이 감소하여 하천의 구조적 변화가 적어지고, 생물다양성이 정체되는 경향이 있음
- 그러나 최근 기후변화로 인하여 정체된 하천 생태계가 다시 급격한 교란에 노출되고 있음. 집중호우 증가는 비점오염원의 유입을 가속화하며, 가뭄 빈도 및 지속시간의 증가는 하천 건천화 및 유로 단절과 같은 극단적인 물환경을 초래하기도 함
- 또한 국내에서는 치수 패러다임의 전환에 따라 기후적응댐 건설과 하천 준설사업 등을 추진하고 있으며, 이는 또 다른 형태의 극단적인 인위적 교란을 야기할 가능성이 높음

2) Ward and Stanford(1995), pp.159-168.

- 그래서 하천 정비 및 기후적응형 치수사업의 추진 과정에서 수생태계 변화 예측 모델을 기반으로 생물다양성, 서식처 구조, 유기물 순환 등 수생태계 전반(혹은 핵심 지표)에 대한 영향을 사전에 분석하고, 이를 반영한 생태영향 저감형 사업계획 수립 및 이행 절차 관리 체계 확립이 필수적임


자료: 연합뉴스(2022.6.2), “봄 가뭄에 타들어 가는 하천”,검색일: 2025.5.30; 세계일보(2024.7.29), “폭우로 대전 3대하천 범람하자 준설 논란 재점화 ‘준설로 물그릇 키워야’vs‘하천 횡단구조물 제거’” ,검색일: 2025.5.30.

〈그림 1-3〉 가뭄으로 인한 하천 바닥(2022년 6월 세종시 소정면 하천)과 하천 준설 현장(2024년 5월 대전 갑천)

○ 국내 수생태계 건강성 평가체계 및 활용 현황

- 「물환경보전법」 제2조 15의2에는 “수생태계 건강성”이란 수생태계를 구성하고 있는 요소 중 환경부령으로 정하는 물리적·화학적·생물적 요소들이 훼손되지 아니하고 각각 온전한 기능을 발휘할 수 있는 상태로 정의하고 있으며, 동법 시행규칙 제24조의2(수생태계 현황 조사), 제24조의3(수생태계 건강성 평가)에서는 수생태계 건강성 조사와 평가를 수행해야 한다고 규정되어 있음
- 그래서 환경부는 전국 하천 3,016개 지점[3]에 대하여 부착돌말, 저서성대형무척추동물, 어류, 수변식생, 서식 및 수변환경에 대한 수생태계 건강성 조사를 수행하고 있으며, 조사 결과를 활용하여 정량적 건강성 상태를 파악하고 있음

3) 환경부(2024a), p.7.

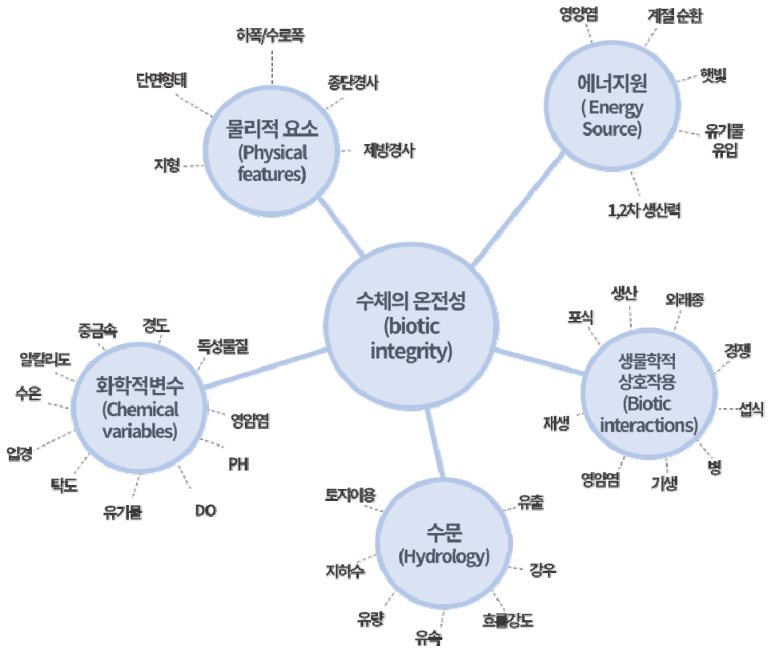
〈표 1-1〉 하천 수생태계 건강성 생물지수별 등급과 기준

| 생물등급 | 환경상태 | 수생생물 | | | 하천환경 | | 표시색 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | 부착돌말류 (TDI) | 저서성대형무척추동물 (BMI) | 어류(FAI) | 수변식생 (RVI) | 서식 및 수변환경 (HRI) | |
| A | 매우좋음 | 90≦ | 80≦ | 80≦ | 65< | 80< | Blue |
| B | 좋음 | 70≦ | 65≦ | 60≦ | 50< | 60< | Green |
| C | 보통 | 50≦ | 50≦ | 40≦ | 30< | 40< | Yellow |
| D | 나쁨 | 30≦ | 35≦ | 20≦ | 15< | 20< | Orange |
| E | 매우나쁨 | <30 | <35 | <20 | ≦15 | ≦20 | Red |

자료: 국립환경과학원(2016), p.137.

- 또한 수생태계 건강성 조사 및 평가 결과를 토대로 '수생태계 건강성 훼손원인 진단을 위한 표준절차서'(국립환경과학원, 2023a, pp.1-19)와 '훼손원인 진단 결과 및 복원방향 자료집'(국립환경과학원, 2023b, pp.1-58)을 발간함으로써 복원 우선지점 설정 및 개선 방향 제시를 위한 참고 자료를 제공하고 있음
- 그럼에도 불구하고 2010년대부터 2022년까지 전국 수생태계 건강성은 어류 건강성 평가지수(FAI) 기준 B등급 이상 지점 비율이 50% 수준에서 개선되지 않고 있으며, 저서동물 평가지수(BMI)는 B등급 이상이 해마다 등락을 반복하는 경향을 보임[4)]
- 수생태계는 개체 간 경쟁, 먹이망 구조 등 내적·생물학적 상호작용과 수질, 유속, 수온, 인위적 구조물 등 외적 환경요인이 복합적으로 작용하는 체계로서 단순한 변수 간 인과관계 분석만으로 수생태계 건강성 향상을 장담하기 어려움(그림 1-4 참조)
- 그래서 최근 다양한 물리·환경 변수를 고려한 생물종 분포나 수생태계 건강성 지수를 예측하는 모델 연구가 활발하게 진행되고 있음. 자연적·인위적 교란에 대한 원인-결과 분석과 개선 시나리오별 효과 예측이 가능해지고 있다는 점에서 현재 진행되고 있는 수생태계 예측모델을 정리하고 비교·분석하여 하천 관리 및 생태계 복원 사업 활용을 위한 방향성을 제시하고자 함

4) 환경부(2024b), p.49.




자료: Abbasi and Abbasi(2011), p.331의 개념도 일부 수정.

〈그림 1-4〉 하천 수체의 온전성 개념도

## 2. 연구 내용 및 목적

○ 본 연구에서는 국내외에서 개발·적용되고 있는 수생태계 예측모델을 비교·분석하여 한계점과 개선점 가능성을 도출하고 물환경 관리 정책의 의사결정 지원을 위한 방안을 제안하고자 다음과 같은 내용으로 구성함

- 국내외 수생태계 예측모델의 구조 및 적용 사례의 비교·검토
- 예측모델 적용에 따른 한계점, 개선 방향 도출
- 기후변화(홍수, 가뭄 등) 및 인위적 교란(하도 정비나 준설 등)에 대한 예측모델 적용 가능성 검토
- 국내 물환경 관리 정책과의 연계 가능성 및 정책 지원 방안 제언

○ 수생태 건강성 항목 중 부착돌말은 수질과 조류 발생과의 밀접한 관련성이 있어 모델링 연구가 오랜 기간 축적되어 왔으며, 수변식생은 식생-수문-지형 간 상호작용(Vegetative Hydro-geomorphology) 관점에서 별도의 수문지형 기반 모델링이 요구됨. 또한 서식 및 수변환경은 제내지 토지이용과 연관이 있어 공간 예측 시 불확실성이 높음

- 이에 본 연구에서는 예측모델 적용의 실효성과 자료 접근성을 고려하여, 하천 수생태계

건강성 평가에서 주요 지표로 활용되는 저서성대형무척추동물과 어류를 주요 분석 대상으로 하는 모델 위주로 선정하였음. 이들은 하천 생태계의 수질과 서식처 상태를 반영하는 대표적 생물군으로서 장기 모니터링 자료를 바탕으로 예측모델 개발 및 검증이 가능하다는 점에서 활용성이 높음

○ 수생태계 건강성 평가 및 예측을 위한 모델은 R&D 연구사업 관련 국내 논문 및 보고서, 국립환경과학원이나 국립생태원에서 개발하고 있는 평가 및 예측모델 개발 보고서 등을 참고하여 국내에 적용하고 있는 모델을 다섯 가지 유형으로 구분하고, 유형별 대표적인 모델을 제시하여 비교하고자 함

# Ⅱ 국내외 수생태계 건강성 평가 및 예측을 위한 모델 비교·분석

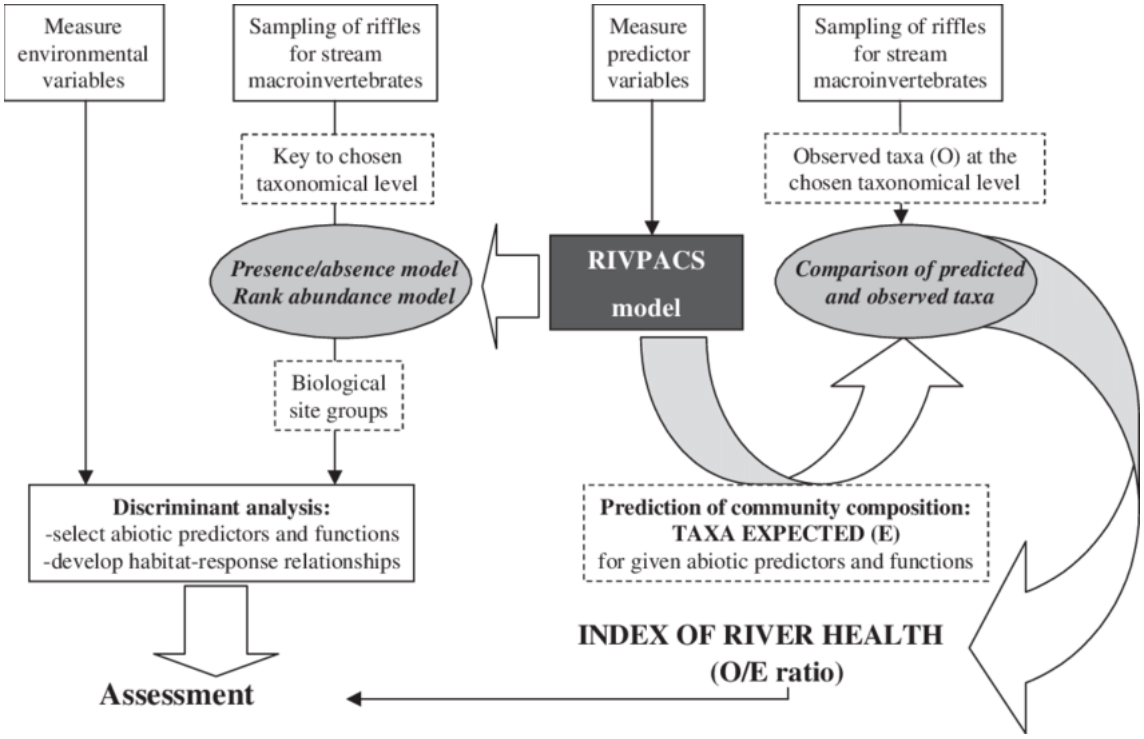
## 1. 생물종 출현 예측모델

### 가. RIVPACS(River InVertebrate Prediction And Classification System)

○ 하천의 생물학적 상태를 평가 및 예측하기 위한 모델로서, 1977년 영국 생태연구소(IFE: Institute of Freshwater Ecology)에서 개발함[5)]

- 주로 저서무척추동물(Benthic Macroinvertebrates) 군집을 대상으로 하여 참조하천(reference)의 환경인자(고도, 하상, 수질 등)와 출현 종 데이터를 이용하여 통계적 관계식을 만든 뒤, 새로운 하천의 환경 조건을 입력하여 기대되는 출현 종(Expected Taxa) 목록을 산출함. 그리고 해당 지점에서 실제 조사된 종 목록과 비교하여 예측 출현 종과 실제 관찰된 출현 종(Observed Taxa)을 비교하여 O/E 지수를 산출하고 하천의 생물학적 수질 상태를 판단함(그림 2-1 참조)
- O/E 지수 산출 방법에서 다양한 통계 분석을 사용할 수 있으며, 최근에는 Random Forest와 같은 기계학습 기반 통계 분석을 활용하고 있음
- RIVPACS의 입력자료는 〈표 2-1〉과 같으며, 기준이 되는 참조하천의 구조적·물리적 변수에 따른 출현 생물종을 선정하고 정의하는 것이 모델의 성능에 큰 영향을 미침. 그래서 해당 모델을 사용하는 각 나라의 환경에 맞도록 참조하천을 설정하고, 다양한 통계기법을 사용하기 때문에 개념은 동일하지만, 호주는 AusRivAS, 캐나다는 CABIN 등으로 나라별 개별 모델로 발전함

5) Wright(2000), pp.1-24.




자료: Beck et al.(2005), p.196.

〈그림 2-1〉 RIVPACS 개념도

〈표 2-1〉 RIVPACS 개요

| 항목 | 설명 |
|---|---|
| 입력변수 | 지형(위도, 경도, 해발고도 등), 기후(연강수량, 기온 등),<br>유역특성(유역면적, 토지피복 등), 하천특성(하폭, 유속, 하상구조 등) |
| 출력변수 | 예산 출현 종 목록(Expected Taxa)<br>O/E(Observed Taxa/ Expected Taxa) 지수<br>EQR(O/E) 등급(Very good, Fairly good, Fair, Poor, Bad) |
| 통계기법 | 주로 다변량 통계 분석(DFA, LDA, CCA 등)을 사용하지만,<br>최근에는 Random Forest 등의 머신러닝 방법 활용 |
| 샘플링 단위 | 채집된 저서무척추동물 종 |
| 공간 규모 | 지점 단위 평가에 적합(하천 단면 또는 구간) |
| 시간 규모 | 특정 시점의 평가 |

자료: 이다영 외(2023); Min et al.(2023) 논문을 바탕으로 저자 재작성.

○ 국내 연구 및 활용 사례

- 국내에서도 RIVPACS와 AUSRIVAS를 기반으로 KRIMPAS(Korean River Macroinvertebrate Prediction and Assessment System)을 개발하여 적용성을 검토하고 있음[6)]
- 이다영 외(2023, pp.45-56)는 지리적 요소, 기후 요소, 토지피복, 수리·수문 요소, 하상 구조 등의 26가지 변수에 대하여 random forest 알고리즘을 사용하여 RIVPACS모델 사용. 국내 저서성 대형무척추동물의 EQR과 BMI를 예측 및 평가하여 국내 적용성을 검토한 바 있음
  - 생물측정망을 통하여 수집된 2016년부터 2018년까지의 저서성 대형무척추동물의 봄철 조사 자료를 이용하였으며, 3,224개의 조사대상 지점에 대하여 30개 과에 대한 과 단위의 생물상 예측
  - 입력변수는 지리적 요소(고도, 경사각, 하천차수), 기후 요소(평년·평균기온, 7월 최고기온, 1월 최저기온), 토지피복(시가화지역, 농경지, 숲, 초지, 습지, 나지, 수역의 비율), 수리 수문학적 요소(하폭, 수폭, 수심, 유속, 여울-흐름역-소의 비율), 하상 구조(6가지) 중 비계량 다차원 척도법을 이용하여 고도, 경사각, 평년·평균기온, 숲의 비율, 하폭, 여울 비율, 하상 구조 중 큰 돌의 비율인 7개의 변수로 선정

○ 모델의 특성

- RIVPACS는 지점의 현재 상태를 진단하는 것이 주된 목적이며, 참조하천에 어떤 종이 분포하고 있는지 알려줌으로써 수생태 복원 목표 및 관리 기준을 설정하는 데 유용함. 하지만 참조하천의 상태를 정의하는 데 어려움이 있으며 하천 정보를 구축하는 데 비용과 시간이 많이 소요됨
- [교란 대응] 특정 종의 부재나 종 조성 변화를 통하여 오염이나 교란의 효과를 간접적으로 진단할 수 있으나, 현재까지 없었던 극단적인 환경에 대해서는 예측 종을 제시하기 어려움
- [기후변화 대응] 미래 변화 시나리오를 직접 모의하지 않지만, 기후변화에 따른 외부 환경 변수가 변경되면 새로운 환경 조건을 입력함으로써 예상 종 목록을 추정할 수 있음

---

6) Min et al.(2023), 2251508.

RIVPACS 정책 활용 사례

□ RIVPACS/RICT(River Invertebrate Classification Tool) 활용

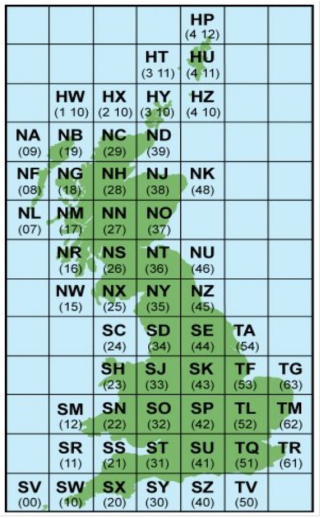
○ 영국, 웨일스, 스코틀랜드, 북아일랜드에서는 RIVPACS IV 예측모델을 구현하는 RICT(River Invertebrate Classification Tool) 소프트웨어를 이용하여 하천 수질 평가 및 목표로 활용하고 있음.[7)]

**RICT input data**

| Field | Notes |
|---|---|
| Site | Must be alphanumeric |
| Waterbody | Optional (for multi-site classification) |
| NGR | Must be upper-case; 1 letter for NI, 2 letters for GB |
| Easting | Must be 5-figures (Excel will remove leading zeroes) |
| Northing | Must be 5-figures (Excel will remove leading zeroes) |

| Value pasted into Excel input file | Value displayed in Excel input file | Value entered into RICT |
|---|---|---|
| 00678 | 678 | 00678 |
| 678 | 678 | 00678 |
| 67800 | 67800 | 67800 |

Check NGR is not incorporated in easting and northing
Sites close to coast occasionally fail – move site slightly inland (*see next slide*)



NGRs (letters indicating 100 km grid) and their corresponding all-numeric values

자료: FRESHWATER BIOLOGICAL ASSOCIATION(2023), p.20.

## 2. 종 분포 모델(SDM: Species Distribution Model)

### 가. MaxEnt(Maximum Entropy)

○ MaxEnt는 종의 출현 데이터만 이용하여 서식지 적합성을 예측하는 종 분포 모델(SDM: Species Distribution Model)*의 하나로서, Steven J. Phillips(Princeton Univ) 등이 개발한 최대 엔트로피 확률 통계 모델링 기법임[8)]

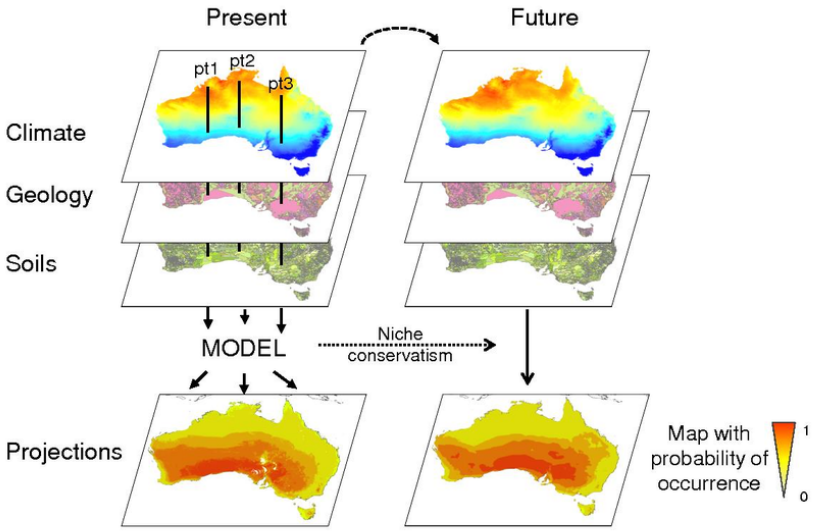
* 종 분포 모델은 환경 조건과 생물종 분포와의 상관관계를 활용하여 주어진 환경에서 해당 종이 분포할 잠재적인 서식지를 예측함

- 개별 생물종의 출현 자료(종, 좌표)와 환경변수(온도, 고도, 토양 등)를 이용하여 대상종이 출현한 환경 특성이 최대 엔트로피 원리에 따라 얼마나 넓게 퍼져 있는지를 계산하기

7) FRESHWATER BIOLOGICAL ASSOCIATION(2025.3.24), "River Invertebrate Classification Tool(RICT)", 검색일: 2025.5.31
8) Phillips et al.(2006), pp.231-259.

때문에 포획이나 관찰된 위치가 주요한 입력변수로 활용됨

- 출현 확률 분포를 예측하기 때문에 다양한 기계학습을 기반으로 하며, 기후변화 시나리오에 따른 종의 미래 서식지 변화를 예측하는 데 주로 사용되고, 보호종, 외래종 등 보전생태학 분야에서도 폭넓게 활용됨



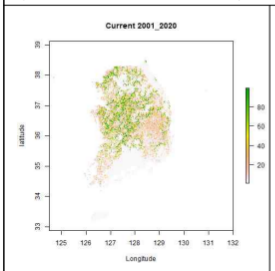

자료: ConservationBytes.com(2020.7.21), “History of Species Distribution Models”, 검색일: 2025.5.31.

〈그림 2-2〉 MaxEnt 개념도

○ 국내 연구 및 활용 사례

- Kim et al.(2024, 820)은 물장군류(Appasus japonicus)를 대상으로 기후변화에 따른 현재 및 미래 분포를 예측함. 환경변수로는 기후 변수 7개(BIO1, BIO5 등), 고도(DEM), 습지와의 거리(DISTANCE), 토지피복(LANDCOVER) 등 총 10개를 사용하였으며, 분석에 사용한 기후 시나리오[SSP126, SSP370, SSP585(2055년, 2085년)]를 바탕으로 물장군류가 현재는 남부 저지대에 널리 분포하고 있으나, 미래에는 북부 고지대로 이동하며, 전체 서식지 면적은 최대 86%까지 감소할 것으로 예측함
- Kim et al.(2020, 10001)은 유속과 수질 변수를 종 분포 모델인 MaxEnt모델에 통합하여 기후변화 시나리오에 따른 담수어의 종 분포를 예측하였으며, 정진호, 배은혜(2015, pp.198-205)는 기후변화에 따른 금강 유역의 어류 종 분포 변화 예측을 위하여 MaxEnt 모델을 사용함

- 고병건 외(2021, pp.259-275)는 베이지안 최적화를 통하여 저서성 대형무척추동물 종 분포 모델 개발 연구를 수행함
  - 국내 저서성 대형무척추동물 중 출현빈도가 높은 개똥하루살이, 등줄하루살이, 줄날도래, 꼬마줄날도래를 분석 생물종으로 선택
  - 입력변수로 기후인자(연평균기온, 7월 최고기온, 1월 최저기온, 연평균 강수량), 지리인자(고도, 경사각, 하천차수), 토지피복인자 비율, 수리수문인자(유속, 수심, 수폭), 수질인자(용존산소량, 전기전도도, PH, BOD, 총질소, 총인)를 활용함
  - Support Vector Machine(SVM), Random Forest(RF), Boosted Regression Tree (BRT), Extreme Gradient Boosting(XGB), Multi Layer Perceptron(MLP)의 5개 기계학습 알고리즘을 사용하여 출현 유무를 예측하였으며, 모든 평가지표에서 0.7 이상의 성능을 나타냄.
- 강성룡 외(2022, p.112)에서는 RCP 시나리오를 기반으로 생물기후변수 19개를 제작하였으며 그중 온도와 강수량을 대표 변수로 설정하여, 양서류 및 어류를 대상으로 종 분포를 예측하는 연구를 수행함
  - 모형은 통계기반의 3개 모형(Generalized Linear Models, Generalized Additive Model, Multivariate Adaptive Regression Splines)과 기계학습 기반의 7개 모형 (Classification Tree Analysis, Flexible Discriminant Analysis, Artificial Neural Networks, Generalized Boosted Models, Surface Range Envelope, Maximum entropy algorithm) 등 종 분포 모형 총 10개를 선택적으로 앙상블 예측을 할 수 있는 BIOMOD2 모형(biomod2 v3.5.1)으로 활용함
  - 가는돌고기, 가시고기, 감돌고기 등 어류 25종에 대한 기후변화 시나리오 대응 서식 분포 예측 모형 결과를 제공함

| Case-1<br>(전국자연환경조사) | | 2021-2040 | 2041-2060 | 2061-2080 | 2081-2100 |
|---|---|---|---|---|---|
|  | RCP4·5 |  |  |  |  |
|  | RCP8·5 |  |  |  |  |

주: Case-1은 전국자연환경조사를 사용한 경우의 감돌고기 분포 현황 및 예측 결과임.
자료: 강성룡 외(2022), p.112.

〈그림 2-3〉 앙상블 종 분포 모형 결과 예시/감돌고기 미래 서식처 예측

○ 모델의 특성

- GIS 데이터가 제공되는 범위는 표현할 수 있으므로, 한 지역에서 국가로 확장할 수 있고, 전 세계 기후 분포 지도도 작성 가능하여 핵심지역이나 민감지역을 한눈에 파악할 수 있음. 하지만 출현 기록이 많은 지역은 과대 평가되고, 자료가 적은 지역은 간과될 한계가 있음
- [교란 대응] 특정 종을 대상으로 예측을 진행하기 때문에 생물군집이나 건강성 지수를 직접적으로 도출하는 데는 한계가 있음
- [기후변화 대응] 모델 내에서 변화를 추정하지는 않지만, 미래기후 변화 시나리오 데이터를 입력함으로써 미래 예측을 수행함

**종 분포 모델 정책 활용 사례**

□ The Murray-Darling Water and Environment Research Program(MD-WERP)

○ 운영 주체: 호주 Murray-Darling Basin Authority, CSIRO

○ 핵심 기능 및 구성: 하천 유량 회복 조치, 수질개선사업 등을 반영한 시나리오별 건강성 예측, 지표종(Indicator species)의 출현 확률을 종 출현모델 및 수리생태 모델로 통합 분석[9)]

○ 예측 결과를 토대로 복원 투자 우선순위 결정

○ 주요 활용 사례: Murray-Darling Basin 전역에서 물공급 정책에 따른 서식처 면적 변화, 수서곤충 출현 예측 결과를 정책 반영

### 나. ClIMEX

○ Hearne software에서 개발한 종 분포 모델의 일종임[10)11)]

- 종의 생리학적 생장 한곗값(온도, 강수, 건기나 우기 등)을 설정하고 기후환경인자에 따른 성장 및 스트레스 함수를 이용하여 생태기후지수(EI: ecoclimatic index)를 산출함
- 일반적으로 EI 값(0~100)이 20보다 크면 해당 지역이 종이 서식하기에 유리한 기후임을 나타냄

○ 국내 연구 및 활용 사례

- 심태용 외(2016, pp.134-142)는 어류 분포에 미치는 기후변화 영향 평가를 위하여 종 분포 모델인 CLIMEX와 서식처 적합성 모델인 PHABSIM을 융합한 모형을 제안함

○ 모델의 특성

- 환경변수별 기여도나 반응곡선을 통하여 어떤 요인이 분포를 좌우하는지 판단할 수 있고, MaxEnt와 동일하게 지도로 표현할 수 있음
- 기후변화에 따른 대상 생물종의 분포를 확인할 수 있으나, 특정 종을 대상으로 모의를 진행하기 때문에 개체군의 동태나 적응과 같은 시간지연 효과는 반영하기 어려움

---

9) Sengupta et al.(2023), pp.1-28.
10) Jung et al.(2016), pp.223-235.
11) Byeon et al.(2018), pp.325-333.

〈표 2-2〉 종 분포 모델 비교

| 항목 | MaxEnt | CLIMEX |
|---|---|---|
| 모델 유형 | 통계적 출현 기반 모델<br>(Correlative or Machine Learning) | 기후 기반 메커니즘 모델<br>(Mechanistic or Process-based) |
| 기반 이론 | 입력된 종의 출현 지점과 환경 변수 간의 관계를 기반으로, 최대 엔트로피 원칙에 따라 종의 서식 가능성을 예측 | 생리학적 임곗값에 기반한 기후 적합성 지수 계산 |
| 입력 데이터 | 종의 출현 지점 좌표(presence-only) +<br>환경 변수(기후, 지형 등)<br>종의 출현 지점(위도, 경도)<br>환경 변수: 기후(온도, 강수량 등),<br>지형(고도, 경사 등), 토지 이용 등 | 종의 생리학적 반응값(온도, 습도 임곗값 등), 출현 지점(선택사항) |
| 출력 | Habitat suitability score(0~1),<br>서식 적합도(probability of presence)<br>환경 변수의 중요도 및 반응 곡선<br>모델의 성능 지표(예: AUC 값) | Ecoclimatic Index(EI): 0~100의 기후 적합성 점수 |
| 기후변화 시나리오 적용 | 가능(기후 변수 포함 시) | 용이(기후 변수 기반이므로) |
| 사용자 인터페이스 | R 패키지, GUI(MaxEnt software),<br>QGIS/ArcGIS 연동 가능 | 전용 GUI, CLIMEX 소프트웨어 필요 |

자료: Byeon et al.(2018); 고병건 외(2021)를 바탕으로 저자 재작성.

## 3. 기계학습(Machine Learning) 기반 모델

○ 다양하고 누적된 과거 자료를 활용하여 통계적 규칙이나 패턴을 학습하여 건강성 지수나 등급을 예측하는 접근법

- 전통적인 회귀(regression) 방법부터 결정나무(decision tree), 인공신경망(aritifical neural network), 베이지안(Bayesian) 방법론 등에 이르기까지 다양한 알고리즘을 활용함. 이러한 모델은 특정 생태 이론보다 데이터 간 관계를 이용하므로 비선형적이고 복잡한 상호작용을 찾아낼 수 있어 최근 활용도가 높아지고 있음. 최근에는 앙상블(ensemble) 모형이나 생성 모델(GAN)을 결합하여 예측 정확도를 높이는 시도가 이어짐
- 기계학습 모델의 성능은 학습데이터의 양과 질이 중요하며, 하천 지점에 대한 환경변수와 동일 지점의 생물학적 건강성 지수(FAI, BMI 등)가 존재하는 데이터세트가 필요함

○ 국내 연구 및 적용 사례

- 우소영 외(2018, pp.863-874)는 SWAT를 이용한 한강유역 83개 지점의 수질, 유량, 기상자료와 건강성지수(FAI, BMI) 자료를 Random forest 방법을 이용하여 예측한 결과, 0.81 이상의 예측 정확도를 나타냄
- 이서로 외(2023, p.106)는 머신러닝 모델의 예측 성능 개선을 위하여 GAN 알고리즘을 적용함. 머신러닝 모델에는 6개 모델(SVM, K-Nearest Neighbors(KNN), Decision Tree(DT), RM, Gradient Boosting Machine(GBM), XGB)을 사용하였으며, 두 가지 데이터세트(Raw 데이터세트, Raw + GAN 데이터세트)로 학습된 모델의 예측 성능을 비교 분석하여 예측 정확도를 BMI 0.92, TDI 0.78, FAI 0.93으로 향상시킴
- 국립환경과학원에서 개발하고 있는 DTK-W 시스템에서도 3가지 생물상(FAI, BMI, TDI)의 건강성 지수 예측을 위하여 낙동강 수계를 대상으로 7종의 단일 AI 모델(SVM, RF, BRT, Multi-Layer Prceptron(MLP), Elastic Net(ELN), Gaussian Process(GP), KNN)을 검토하고, 이종 앙상블 모델을 개발하고 있음(국립환경과학원, 2023c, pp.5-8)
- 또 서울시립대학교(2024, pp.34-35)은 수질오염, 유속 변화 등 환경 변화에 따른 생태계 군집 구조(식물플랑크톤, 동물플랑크톤, 저서성 대형무척추동물, 어류 등)를 계층적 베이지안 네트워크(HBN: Hierarchical Bayesian Network)로 활용한 하천 생태계 군집구조 변화 예측모델을 개발하고 있음

○ 모델의 특성

- 기계학습 기반 모델은 데이터 범위 내에서는 신뢰할 만한 예측성을 보이지만, 범위를 벗어나면 신뢰도가 저하되는 경향이 있음
- 입력변수 간의 상호작용이 고려되고 복잡한 패턴을 이용하기 때문에 예측 정확도가 높은 반면, 일부 알고리즘은 내부 계산 과정이 복잡하여 예측의 이유를 설명할 수 없는 경우가 많음
- 신뢰성 있는 데이터 축적이 필요하며 중요한 특정 변수를 빠뜨리지 않고 학습에 이용할 수 있는 데이터세트가 필요함
- [교란, 기후변화 대응] 입력변수도 수질, 기상, 지형, 구조물의 유무 등 다양하게 입력할 수 있으며, 출력변수가 FAI나 BMI뿐 만 아니라 어류 종수, 희귀종 개체수, 민감종 군집 등 원하는 지표를 산출할 수 있음

## 4. 물리적 서식처 평가 및 예측모델

○ 「물환경보전법」 제22조의3에서 수생태계 건강성 유지를 위하여 필요한 최소한의 유량을 규정하고 있을 정도로, 수생태 건강성을 위한 환경생태유량 확보는 수생태계 건강성 예측을 위한 매우 중요한 변수로 사용됨. 그래서 생물종이나 개체군을 출력변수로 사용하지는 않지만, 생물종의 서식처 적합도를 산정하는 물리적 서식처 평가 모델도 비교해 보고자 함

### 가. PHABSIM(Physical Habitat Simulation System)

○ 미국 USGS에서 개발한 물리적 서식지 모의로서, 어류 종의 다양한 생활 단계 또는 레크리에이션 활동에 대한 유량과 물리적 서식지 간의 관계를 모의하는 것을 목적으로 함[12)]

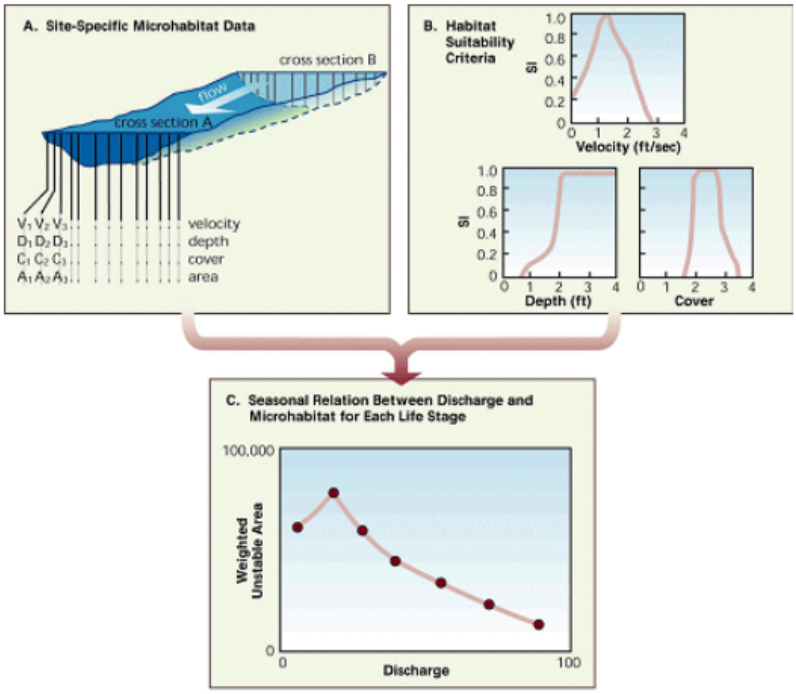
- 하천 유량 증분 방법론(IFIM)*에서 가장 널리 이용되고 있는 모델 중 하나임
  * IFIM(Instream Flow Incremental Methodology)은 하천 내 적정 유량(in-stream flow)을 과학적·정량적으로 산정하기 위한 대표적인 수문·생태학적 평가 방법론
  * 1980년대 미국에서 연어 개체수가 감소하자 어류 서식처 보전을 위하여 하천 유지유량에 관한 연구가 소개되었으며, 서식처 공간에서 수리조건에 적합한 가중가용면적(WUA: Weighted Wsable Area)-유량 관계를 찾아 어류서식에 적합한 최적 유량을 결정하게 됨.[13)]
- PHABSIM은 서식처의 물리적 조건(수심, 유속, 저질)과 각 물리적 조건에 따른 목표종의 서식 적합성 지수를 입력자료로 요구함. 서식처 적합성 지수는 목표종에 대한 현장 샘플링을 기반으로 한 적합성 정보를 바탕으로 가중가용면적이라는 서식지 측정값을 계산하는데 사용됨
- 상세한 현장 측량 자료를 필요로 하며, 하천 구간 횡단면의 수심과 유속, 하상구조, 목표생물종의 서식 적합지수가 필요함

○ 모델의 특성

- 현장 측량과 자료 구축에 많은 시간과 비용이 소요되며, 특정 생물종을 대상으로 모의하기 때문에 군집에 대한 모의는 어려움
- 유량에 따른 서식지의 수심, 유속, 저질에 따라 적정성을 판단하기 때문에 수온이나 수질은 별도의 모델로 연계하여 사용하여야 함

---

12) USGS(2012.7.9), “Physical Habitat Simulation(PHABSIM) Software for Windows”, 검색일: 2025.5.24.
13) 이현석 외(2018), p.5.




자료: 강형식(2010), p.10.

〈그림 2-4〉 PHABSIM 개념도

○ 국내 연구 및 활용 사례

- 김용원 외(2021, pp.819-833)는 안동댐을 대상으로 준분포형 수문 모델인 SWAT와 PHABSIM을 연계하여 피라미와 돌고기에 대한 환경생태유량을 산정함
- 국립환경과학원(2018, p.11)에서는 환경생태유량 산정 및 고시(안)를 마련하였으며, PHABSIM을 이용한 환경생태유량 산정 방법을 제시함

### 나. River2D

○ 하천 유량 증분 방법론(IFIM)을 구현하는 2차원 물리적 시식지 모델로서, 앨버타대학교에서 개발함. 자연 하천에 사용하는 2차원 모형으로 수심을 평균화한 유한요소모형을 사용하며, PHABSIM의 2차원 버전으로 볼 수 있으며, 2차원 지형 변동을 모의하기 때문에 1차원 PHABSIM에 비하여 유량에 따른 지형 단면의 변화를 고려할 수 있음

○ 국내 연구 및 활용 사례

- 한국환경산업기술원(KEITI)에서 진행하는 R&D 연구사업[14]에서는 SWAT(유역 모델)-CE-QUAL-W2(수질 모델)-RIVER2D을 연계하여 환경생태유량을 산정함

### 다. HABITAT

○ HABITAT 모델은 네덜란드 Deltares가 개발한 공간분석도구로서 단일 생물군뿐만 아니라 군집(community) 내 종간 상호작용을 고려한 특정 생물군의 서식지 적합도를 평가하는데 사용할 수 있음

- PHABSIM과 유사하게 서식처 적합도 지수를 활용하여 서식도 적합성 지수를 도출하지만 다양한 변수를 입력할 수 있음
- HABITAT 모델은 Deltares에서 개발한 3차원 수치모델인 Delft3D-FLOW, SED, WAQ, BLOOM과 직접 연계할 수 있어 수심과 유속, 유사량, 수질 등 환경 조건의 변화가 변화된 환경 조건이 수생태에 미치는 영향을 평가할 수 있으며, 다양한 예측 목적을 갖는 다양한 공간 규모에 적용 가능함[15]

○ 국내 연구 및 활용 사례

- 임혜정 외(2021, pp.217-228)는 수리수질 모델인 Delft3D-FLOW와 생태모델인 HABITAT 모델을 연계시켜 하천의 건강성을 추정함. 영산강을 대상으로 보 운영조건에 따라 수위와 수온을 예측하였으며, 모의 결괏값을 HHABITAT의 입력자료로 사용하여 꼬마하루살이류의 출현 여부를 약 77% 예측함
- 한국환경정책·평가연구원(2021, p.34)에서는 생태적 서식적합성 모형인 EHSM(Ecological Habitat Suitability Model)과 어류 종 분포 모형(FSDM: Fish Species Distribution

14) 건국대학교(2021), pp.1-235.
15) 최병웅 외(2020), p.2.

Model)을 개발하여 사용함

- EHSM은 PHABSIM에서 사용하는 수심과 유속의 서식적합도, CLIMEX(CLIMatic indEX)에서 평가하는 생리적 서식적합도(수온에 따른 성장과 스트레스), 수질에 대한 서식적합도(TSS, TN, TP)를 예측하고, 생태적 서식적합도와 서식취약성을 산정함
- FSDM은 MaxEnt 알고리즘을 이용하여 지형(고도, 경사도), 기후(기온, 강수량), 수량(유량), 수질(TSS, TN, TP) 인자에 따른 어류의 출현 확률을 예측하고, 출현 종수의 합인 종 풍부도와 종의 변화를 나타내는 종 전환율을 산정함

〈표 2-3〉 물리적 서식처 모델 비교

| 항목 | PHABSIM 설명 | River2D | HABITAT |
|---|---|---|---|
| 해상도 | 1차원 단면 | 2차원(2D) 공간 해상도 (격자 또는 삼각망) | 1차원 단면 |
| 입력변수 | 유량, 유속, 수심, 하상 입경, 목표종별 HSI(Habitat Suitability Index) | PHABSIM 입력변수 + DEM, 조도계수 | 수문, 지형, 기질, 식생, 수질(수온, DO 등) |
| 출력변수 | 유량별 유속, 수심, 목표종 별 CSI(Cumuculated Suitablity Index)와 가중가용면적(Weightable area) | | |
| 통계기법 | 수리학적 계산 방법 내재 | 유한요소법(2D) | Formula based model을 통한 여러 변수 반영 |
| 샘플링 범위 | 대상 구간의 유속, 수심, 하상 입경 자료, 채집한 어류의 유속, 수심, 하상 입경에 따른 적합성 지수 | | 어류 외에도 저서성 대형무척추동물, 수생식물 등 다양한 생물군 적용 가능 |
| 공간 규모 | 특정 구간 단위(하천 수로로 진입 가능한 하천을 대상으로 수 km 이내) | | 특정 구간부터 유역 단위 모의 가능 |
| 시간 규모 | 특정 시점의 평가 | 특정 시기 및 시나리오 기반 | 특정 시점의 평가 |

자료: 노경범 외(2011, pp.822-829); 국립환경과학원(2018, 2020)을 바탕으로 저자 재작성.

○ [교란 대응] 물리적 서식처 모델은 하천 구간에 대한 상세한 결괏값을 도출할 수 있어, 보 설치 전후 비교, 댐 상하류 비교 등 특정 구간에 대한 물리적 구조 변화에 따른 서식처 적합성 관련 영향 분석이 가능함

○ [기후변화 대응] 미래 변화 시나리오를 직접 모의하지 않지만, 기후변화에 따른 외부 환경변수가 변경되면 새로운 환경 조건을 입력함으로써 예상 서식처 적합도를 산정할 수 있음

## 5. 먹이망 평가 및 예측모델

### 가. AQUATOX

○ 미국 환경보호청(EPA)에서 개발한 AQUATOX는 수생 생태계에서의 오염물질의 운반과 그 생태학적 영향을 시뮬레이션하는 모델로, 수질 모델링과 생태학적 위험 평가를 통합한 도구임

- 변수 간 인과관계를 설명할 수 있는 구조모델로서 구성요소들 간의 피식-포식 관계를 정의하는 먹이망 기반 모델[16]임
- 가장 하위 지위는 1차 생산자에 속하는 식물플랑크톤, 수생식물이고, 2차 소비자는 1차 생산자와 유기쇄설물을 섭식하는 동물플랑크톤과 초식성 무척추동물이며, 3차 소비자는 1, 2차 소비자를 포식하는 잡식성 무척추동물과 초식 및 잡식성 어류이고, 4차 소비자는 어류 중에서도 1, 2, 3차 소비자 또는 어류만을 포식하는 육식성 어류에 해당(강준치, 배스 등)함[17]
- 수생 생물종(어류, 무척추동물, 조류 등)의 생장, 번식, 개체수 변화를 예측하고, 물리·화학적 조건(온도, DO, 유해물질 등)에 따라 생태계 내 종 간 상호작용, 생물량 변화를 시뮬레이션함
- 기본적으로 GUI를 통해 모델 구축에 필요한 정보를 입력하며, 모델계수 259종류, 식물 69종, 무척추동물 56종, 어류 80종, 독성물질 69종 DB를 제공하며, GUI에서 이를 선택할 수 있고 기존의 DB를 수정할 수 있음

○ 앞서 서술한 모델들에 비하여 방대한 데이터를 필요로 함. 모델링 대상 생태계의 종 목록과 각 종의 생물학적 매개변수(성장률, 자연사망률, 포식에너지 효율 등), 먹이습성, 환경인자(온도, 영양염, 유속 등), 화학물직 동태 등을 입력자료로 입력하여야 함(그림 2-5, 그림 2-6 참조). AQUATOX는 초기조건으로 각 생물군의 개체수/농도와 수환경 상태(수체 부피, 유기물 부하, 빛 투과도 등)를 요구하고, 생물군마다 성장식, 섭식식 등의 수식을 파라미터와 함께 정의하여야 함

---

16) 박영석, 구경아(2022), p.264.
17) 국립환경과학원(2019), p.6.

| 작용 | 대상 기능군 $P_h$ | $P_e$ | $P_M$ | $P_B$ | 계수 내용 | AQUATOX | 단위 | 관련 수식 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Growth | ○ | ○ | ○ | ○ | Saturating Light | 포화 일사량 | Ly/d | 18,19 |
| | ○ | - | - | - | Max. saturating Light | 최대 포화 일사량 | Ly/d | 18,19 |
| | | | | | Min. saturating Light | 최소 포화 일사량 | Ly/d | 18,19 |
| | ○ | ○ | ○ | ○ | P Half saturation External | 인 반포화농도 | KPO4 | mg/L | 21 |
| | | | | | N Half saturation External | 질소 반포화농도 | KN | mg/L | 22 |
| | | | | | Inorg. C Half-saturation | 무기탄소 반포화농도 | KCarbon | mg/L | 23 |
| | | | | | Temp. Response Slope | 온도성장 기울기 | Q10 | - | 16,17 |
| | | | | | Optimum Temperature | 최적성장온도 | TOpt | ℃ | 13 |
| | | | | | Maximum Temperature | 최대성장온도 | TMax | ℃ | 13 |
| | | | | | Min Adaptation Temp | 최소적응온도 | TRef | ℃ | 13 |
| | | | | | Max. Photosynthetic Rate | 광합성율 | PMax | 1/d | 25 |
| | | | | | Photorespiration Coefficient | 광 호흡계수 | KResp | g/g·d | 25 |
| | | | | | P : Organics | 세포 내 인비율 | P2Org | ratio | - |
| | | | | | N : Organics | 세포 내 질소비율 | N2Org | ratio | - |
| | | | | | wet to dry | 건습비 | Wet2Dry | ratio | 45 |
| | | | | | C : Chlorophyll a | 탄소/클로로필 | Plant_to_Chla | g C/g Chla | 20 |
| | ○ | - | - | - | Surface Floating | 표층 부유 | SurfaceFloating | yes/no | 1 |
| | ○ | ○ | ○ | ○ | Resp Rate at 20 deg. C | 호흡율 | Resp20 | g/g·d | 24 |
| Mortality | | | | | Mortality Coefficient | 사망률 | KMort | g/g·d | 26 |
| | ○ | ○ | ○ | ○ | Exponential Mort. Coeff | 사망률 계수 | EMort | g/g·d | 26 |
| | | | | | Light Extinction | 소광계수 | ECoeffphyto | 1/mg/$m^2$ | 18 |
| | ○ | - | - | - | Sedimentation Rate | 침강속도 | KSed | m/d | 29 |
| | ○ | - | - | - | Exp. sedimentation Coeff | 침강계수 | ESed | - | 30 |
| | - | ○ | ○ | ○ | Percent Lost in Slough | 과손 비율 | PctSloughed | percent | 31 |
| | - | ○ | ○ | ○ | Critical Force | 임계하중 | FCrit | newtons | 31 |
| | - | ○ | ○ | ○ | Reduction in still Water | 저항율 | Red_Still_Water | fraction | 31 |
| Internal Nutrients | ○ | ○ | ○ | ○ | N-Half-saturation | 세포 내 질소 반포화농도 | NHalfSatInternal | g N/ g AFDW | 40 |
| | | | | | P-Half-saturation | 세포 내 인 반포화농도 | PHalfSatInternal | g P/ g AFDW | 41 |
| | | | | | N Max Uptake rate | 질소 소비속도 | MaxNUptake | g N/ g AFDW·d | 40 |
| | | | | | P Max uptake rate | 인 소비속도 | MaxPUptake | g P/ g AFDW·d | 41 |
| | | | | | Min N ratio | 세포 내 질소비율 (임계성장) | MinNRatio | g N/ g AFDW | 40 |
| | | | | | Min P ratio | 세포 내 인 비율 (임계성장) | MinPRatio | g P/ g AFDW | 41 |
| Capacity | - | ○ | ○ | ○ | Carrying Capacity | 개체수용력 | Carry_capac | g/$m^2$ | 35 |
| | - | ○ | ○ | ○ | VelMax | 최대유속 | Macro_VelMax | cm/s | 35 |
| Habitat | ○ | ○ | ○ | ○ | Percent in Riffle | 서식지비율(여울) | PrefRiffle | % | 37 |
| | | | | | Percent in Pool | 서식지비율 (수변, 정체수역) | PrefPool | % | 37 |
| | | | | | Percent in Run | 서식지비율(호름구간) | PrefRun | % | 37 |

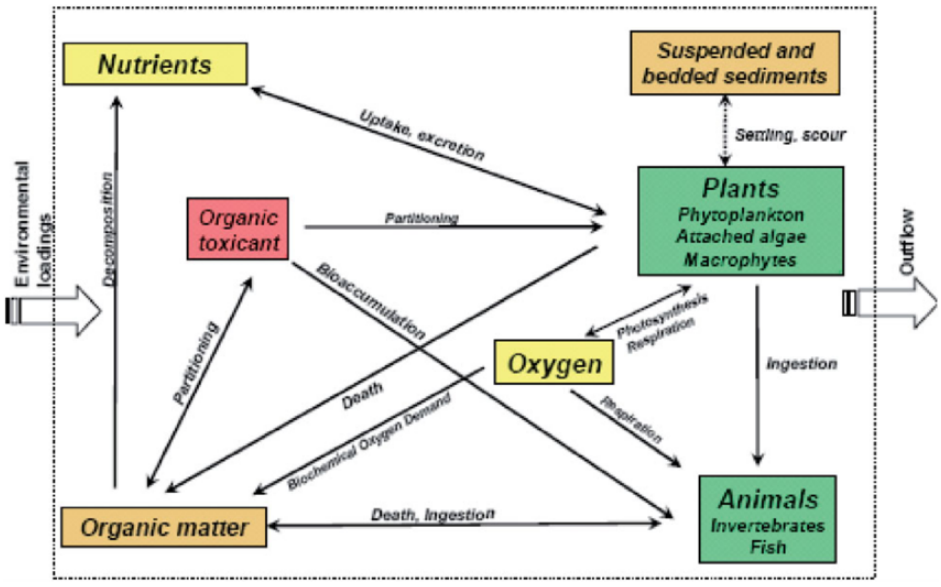
※ 대상 기능군 ($P_h$ : Phytoplankton, $P_e$ : Periphyton, $P_M$ : Macrophyte, $P_B$ : Byophyte)

| 작용 | 대상 기능군 F | $I_P$ | $I_N$ | $I_B$ | $I_c$ | 계수 내용 | AQUATOX | 단위 | 관련 수식 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Grazing or Predation | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Half saturation Feeding | 반포화섭식농도 | FHalfFast | mg/L | 6 |
| | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Maximum Consumption | 최대섭식량 | CMax | g/g·d | 5 |
| | | | | | | Min. prey for Feeding | 최소먹이량 | BMin | g/$m^2$, mg/L | 7 |
| | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Selective feeding | 먹이추적(고탁도환경) | Sorting | yes/no | 11 |
| | | | | | | Burrow index | 굴적(피난) | Burrow_Index | yes/no | 10 |
| | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Refuge | 먹이추적(피난처) | CanSeekRefuge | yes/no | 10 |
| | ○ | - | - | - | ○ | slope for Sed.Response | 부유물 성장저해작선 기울기 | Slop6SFeed | - | 11 |
| | | | | | | Intercept for Sed.Resp | - | Intercept6SFeed | - | 11 |
| Growth | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Temp. Response Slope | 온도성장작선 기울기 | Q10 | - | 16,17 |
| | | | | | | Optimum Temperature | 최적성장온도 | TOpt | ℃ | 13 |
| | | | | | | Maximum Temperature | 최대성장온도 | TMax | ℃ | 13 |
| | | | | | | Min adaptation Temp | 최소성장온도 | TRef | ℃ | 13 |
| | | | | | | Specific Dynamic Action | 먹이소화율 | KResp | - | 25 |
| | | | | | | Mean wet weight | 습중량 | KExcr | g | 47 |
| | | | | | | N to Organics | 체내 질소비율 | N2OrgInit | fraction_dry | - |
| | | | | | | P to Organics | 체내 인비율 | P2OrgInit | fraction_dry | - |
| | | | | | | Wet to dry | 건습비 | Wet2dry | ratio | 47 |
| | | | | | | Respiration | 호흡율 | Resp | 1/d | 24 |
| Mortality | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Mortality Coefficient | 사망률 | KMort | 1/d | 26 |
| | ○ | - | - | ○ | ○ | Sensitivity to Sediment | 부유물민감도 | SesnToSediment | select | - |
| Capacity | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Carrying Capacity | 개체수용력 | KCap | g/$m^2$ | 35 |
| | | | | | | Frac. in Water Column | 수체/퇴적층 서식비율 | FracInWaterCol | fraction | - |
| | | | | | | Velmax | 최대유속 | VelMax | cm/s | 35 |
| | ○ | - | - | - | - | Removal due to Fishing | 어획비율 | Fishing_Frac | fraction/d | 3 |
| Habitat | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Percent in Riffle | 서식지비율(여울) | PrefRiffle | % | 37 |
| | | | | | | Percent in Pool | 서식지비율 (수변, 정체수역) | PrefPool | % | 37 |
| | | | | | | Percent in Run | 서식지비율(호름구간) | PrefRun | % | 37 |
| Spawning | ○ | - | - | - | - | Auto Spawn | 산란여부 | AutoSpawn | on/off | 38 |
| | ○ | - | - | - | - | SpawnDate$^2$ | 산란기간 | SpawnDate | d | 38 |
| | ○ | - | ○ | ○ | - | Gametes / Biomass | 체내생식세포비 | PctGamete | ratio | 38 |
| | ○ | - | ○ | ○ | - | Gamete Mortality | 생식세포 사망률 | GMort | 1/d | 38 |
| Diet | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Preference | 먹이선호도 | Preference | - | 8 |
| Toxic Bio accumulation | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Mean lifespan | 평균수명 | LifeSpan | days | 47 |
| | | | | | | Fraction that is lipid | 체내지질비율 | FishFracLipid | Wet wt | 47 |
| Low Oxygen | ○ | ○ | ○ | ○ | - | Lethal Conc | 사망 저산소농도 | O2_LethalConc | mg/L | 45 |
| | | | | | | Percentage Killed | 저산소사망비율 | O2_LethalPct | % | 44,45 |
| | | | | | | EC50 Growth | 성장 EC50 | O2_EC50growth | mg/L | 45 |
| | | | | | | EC50 Reproduction | 생식 EC50 | O2_EC50repro | mg/L | 45 |
| Ammonia Toxicity | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | LC50, Total Ammonia | 암모니아 LC50 | Ammonia_LC50 | mg/L | 42,43 |
| Salinity | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | Minimum Tolerance | 염분사망계수 | Salmin | ‰ | 46 |
| | | | | | | Maximum Tolerance | | Salmax | ‰ | 46 |
| | | | | | | Coefficient 1 | | Salcoeff1 | - | 46 |
| | | | | | | Coefficient 2 | | Salcoeff2 | - | 46 |

F : fish, $I_P$ : Plankton Invertebrate, $I_N$ : Nekton Invertebrate, $I_B$ : Benthic Invertebrate, $I_c$ : Benthic Insect
※ Age-class 모의 시 설정

자료: 국립환경과학원(2019), pp.13-14.

〈그림 2-5〉 AQUATOX의 주요매개변수(좌: 식물, 우:동물)




자료: Park and Clough(2014). p.2.

〈그림 2-6〉 AQUATOX 개념도

○ 국내 연구 및 활용 사례

- 경희대학교(2021, pp.1-220)은 정수생태계의 수생태계를 평가하고 예측하기 위하여 Delft3D와 AQUATOX를 연계하는 모의를 수행함
- 국립환경과학원(2019, p.6)에서도 수리수질 모델인 EFDC-NIER과 AQUATOX를 연계하는 모델을 개발함

## 나. EwE(Ecopath with Ecosim)

○ EwE는 2011년 캐나다 밴쿠버에서 구성된 Ecopath Research and Development Consortium(https://ecopath.org/)에서 개발 배포하고 있는 생태계/생태 모델링 무료 프로그램임

- EwE는 세 가지의 주요 요소로 구성되어 있으며, 세 모듈을 통합한 한 모델로 어업에서 어획 대상 환경수용량을 추정하는 방법으로 개발됨[18)]
  - Ecopath: 정적이며 질량균형모델을 기반으로 하는 모델, 주어진 생태계의 종(혹은 영양단계)별 생체량, 생산/섭식률, 초식/포식 관계를 질량수지로 맞추어 한 시점의 영양구조를 평가함. Ecopath를 구축하려면 각 종(또는 영양단계)의 생체량(혹은 밀도), 영양단계별 생산/소비 비율, 식성 구성(먹이 항목별 비율), 어획 또는 외부 유입/유출 정보를 테이블로 작성해야 함
  - Ecosim: 시간에 따른 구성요소들의 변화에 따라 생태계 구조의 변화를 예측하고 정책 지원을 위한 모델
  - Ecospace: 시공간적 변화 모델
- 영양단계 및 먹이망 기반 모델로서 종 간 포식/피식 관계를 통해 군집 구조와 생물량 변화를 예측하고, 시나리오에 따른 종 다양성, 우점종 변화, 생태계 구조 안정성 등을 평가할 수 있음
- 공간적 버전(Ecospace)을 사용하면 서식 분포를 모의할 수 있지만, 주로 해양생태계 분야에서 사용됨

---

18) Christensen and Walters(2004).

**먹이망 모델 정책 활용 사례**

□ 미국은 국가 차원에서 수생태계의 평가-예측-정책 연계를 위해 AQUATOX 모델 활용

○ 운영 주체: 운영 주체: 미국 환경보호청(EPA)[19)]

○ 정책 시나리오 적용: 특정 오염원 저감, 유량 조절, 점오염원 통제 등의 개입 시나리오 입력 후 생태계 반응 시뮬레이션 (오염원 관련 BASIN모델과 연계)

○ 주요 활용 사례: 체서피크만, 오하이오강, 미시시피강 유역 등에서 NARS 결과를 바탕으로 AQUATOX 예측모델을 적용해 오염저감 전략 수립, EPA 주도의 수계 복원 투자 우선순위 결정에 활용됨

### 다. 먹이망 모델 특성

○ 먹이망 모델은 공간적으로 하나의 생태계 전체(예: 단일 하천이나 호수 전체)를 대상으로 하는 경우가 많음

- 먹이망 모델은 물리·화학·생물을 아우르는 종합 생태계 모의 모델로서, 수질이 생산자에 미치는 영향, 생산자가 2차, 3차 생물에 미치는 영향 등 연쇄적 반응에 대한 일련의 과정을 확인할 수 있으며, 한 가지 요인에 따라 발생하는 여러 작용을 파악할 수 있게 해줌
- [교란, 기후변화 대응] 특히 기후변화, 오염사고, 외래종 유입 등 여러 시나리오에 대하여 모의가 가능하며, 독성물질이나 미세플라스틱 등 신규 오염 물질의 축적과 영향을 파악할 수 있어 유해물질 관리 정책에 활용할 수 있음. 한 식생 복원과 외래종 퇴치 중 어느 쪽이 생태계 건강성에 유리한지와 같은 비교 검토가 가능함
- 하지만 많은 입력값으로 데이터가 부족할 수 있으며, 매개변수가 수백 개에 달하여 모델을 보정하기 힘들고 계산 과정이 복잡함

○ 생태계 시스템을 모의할 수 있어 FAI, BMI와 같은 지표 변화에 활용하는 종수, 내성종, 민감종 비율 등을 출력값으로 얻을 수 있으므로 활용 가능성이 높음

- AQUATOX는 일 단위로 수개월, 수년까지 주로 모의하고, Ecosim은 보통 수년, 수십 년을 월별 혹은 연별 스텝으로 모의함
- 하지만 학술연구 차원으로 사용하고 있으며, 정책적 실행 도구로 사용하려면 데이터나 활용도 면에서 활용성을 높일 수 있는 데이터 구축이 필요함

---

19) EPA(2025.1.16), “AQUATOX Features and Tools”, 검색일: 2025.5.19.

# Ⅲ 정책 활용을 위한 모델 적용 방향성 제언

## 1. 수생태계 평가 및 예측모델 간 비교

○ 최근 수생태계 예측 연구는 데이터 기반 기계학습 기법이 중심적인 역할을 수행하고 있으며, 이는 단순한 회귀분석을 넘어 종 출현모델(RIVPACS 등)과 종 분포모델(MaxEnt 등)등에도 기계학습 기반의 통계기법이 광범위하게 적용되고 있음. 다양한 환경요인과 생물지표 간의 비선형 관계를 해석하고, 대규모 자료에서 패턴을 추출하는 데 있어 기계학습 기법의 활용 가능성은 높으며, 현재 수생태계 예측모델 분야는 기계학습 기반 접근법이 주도하는 연구 국면으로 전환되고 있다고 평가할 수 있음

- 하지만 대부분의 기계학습 예측 모델은 모델의 구조와 적합성을 검토하는 분석 및 검증 단계에 머물러 있으며, 이를 정책결정이나 실무 적용을 위한 소프트웨어 또는 플랫폼 수준으로 개발하기까지는 상당한 기술적·시간적 투자가 필요한 상태라고 판단됨

○ 반면, PHABSIM, RIVER2D와 같은 물리서식처 기반 모델은 GUI기반 소프트웨어로 구현되어 있어 사용자 접근성과 정책 활용도가 높으며, 현재도 환경생태유량 산정의 실무 도구로 활용되고 있음. 하지만 모델이 주로 유량, 수심, 유속, 하상재질 등 물리적 요소만을 중심으로 서식처 적합성을 평가하기 때문에, 수질, 오염물질, 기후 등 다양한 생태계 교란 요인을 포괄적으로 반영하는데 한계가 존재함. 이러한 한계를 보완하기 위하여 향후에는 다양한 변수를 고려할 수 있는 확장형 서식처 모델(HABITAT)의 적용 범위를 확대하고, 예측모델과의 연계를 통한 활용 가능성을 높여나갈 필요가 있음

○ AQUATOX와 같은 먹이망 모델은 수체 내 에너지 흐름과 물질순환, 다양한 생물종 간 상호작용을 통합적으로 모의할 수 있는 정교한 생태계 모델임. 이를 통하여 장단기 생태계 반응을 모의할 수 있는 강점이 있지만, 생물 생체량, 성장률, 에너지효율 등 다수의 생물학적 입력자료가 요구되어 현업 활용에는 다소 제약이 있는 모델이라 할 수 있음

〈표 3-1〉 수생태계 예측 모델 비교

| 모델 (대표모델) | 예측 대상 | 예측 목표 | 환경변수 | 통계 및 모델링 기법 | 목적 | 공간 규모 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 종 출현 모델 (RIVPACS) | 저서성 대형무척추 동물 | 수생무척추동물 군집 출현 예측 | 지형, 지질, 유역면적, 고도, 하폭, 수온 등 | 다변량 통계분석, Random Forest 등 통계·기계학습 | 생물학적 건강성 평가, 수질 평가 | 중~대 유역 단위 |
| 종 분포 모델 (MaxEnt) | 특정 수생생물 종 | 특정 종의 분포 예측 | 기후, 토양, 지형, 수문 변수 등 | MaxEnt, GLM, GAM, Random Forest 등 통계·기계학습 | 종 보전계획, 서식지 적합성 평가 | 종 단위~국가/대륙 규모 |
| 기계학습 기반 예측모델 | 어류, 저서성 대형무척추 동물 등 | 건강성 지수 (FBI, BMI 등) 또는 종의 존재·풍부도 예측 | 수질, 유량, 유속, 하폭, 수심, 기상자료 등 다양한 변수 | Random Forest, SVM, XGBoost, ANN 등 | 건강성지수 예측, 예측 정확도 향상 | 유역~국가 |
| 물리적 서식처모델 (PHABSIM) | 어류 등 서식처 선호 종 | 유량 변화에 따른 서식처 면적 변화 예측 | 유량, 수심, 유속, 저질 특성 등 물리적 지표 | 수치유동해석 + 통계적 서식처 적합성 분석 | 최적 서식처 유량 산정, 생태유량 설정 | 단일 하천 구간 (수 m~수 km) |
| 먹이망모델 (AQUATOX) | 식물 플랑크톤, 무척추동물, 어류 등 전 군집 | 물질 및 에너지 흐름을 통한 먹이망/군집 동태 예측 | 수질, 기상, 생물 간 상호작용, 영양염류 등 | 시계열 동태계 모델(ODE 기반 시뮬레이션) | 오염 영향 평가, 장기 변화 시뮬레이션 | 주로 하천, 호수, 소유역 단위 |

자료: 저자 작성.

## 2. 수생태계 예측모델 국내 활용성 강화 및 제도 개선 방안

○ 조사자료 한계 극복 및 입력자료 다변화

- 수생태계 건강성 평가를 수행하는 생물측정망이 3,016개에 이르고, 한 지점당 1년에 2회(봄, 가을) 수행하는 조사결과가 2008년부터 2024년까지 축적되어 있어 전국을 대상으로 기계학습을 수행하여 생물종의 분포, 출현 종수, 건강성지수 등을 예측하는 데이터 측면에서 부족함은 적은 편임
- 하지만 년 중 일(혹은 시간) 단위로 자료를 측정하는 기상이나 수위 자료를 활용하여 하천별·지점별 특정 목적에 대한 예측을 수행할 수 있는 연구와 다르게, 수생태계는 지점 당 변수의 파라미터 개수가 최대 32개에 지나지 않아(2008년부터 2024년까지 모두 데이

터가 있는 경우) 특정 유역이나 하천별 환경변수에 따른 수생태계를 예측하기 위한 기계학습 모델에서의 입력변수는 상대적으로 매우 적은 편임. 또한 1년에 2회 조사로 인하여 특정 교란(보 건설, 준설사업 등)에 대한 영향을 평가하고 예측하는 것은 더욱 어려움

- 연 2회 정밀조사 외에 비전문가나 학교, 시민단체, 지자체와 협력하여 생물조사를 실시하거나, 환경 DNA(eDNA)를 활용하여 시계열 자료의 결측치를 보완할 수 있음. 다만 비전문가의 생물자료임을 별도로 표기하고 참고자료로 활용할 수 있도록 기록을 작성하여 관리할 필요가 있음
- [교란 대응] 교란에 의한 수생태계의 영향을 평가하고 예측하기 위한 수생태계 예측 모델을 구동하기 위해서는 사업 전에 실시하는 환경영향평가와 사업 후에 실시하는 사후환경영향평가 조사 결과를 DB화하여 데이터의 입출력 자료를 보강하여 보 건설, 준설사업 등 하천사업에 따른 전국단위 영향을 평가할 수 있을 것으로 판단됨. 또한 교란 영향 평가 및 예측에 적용할 수 있는 RIVPACS, PHABSIM이나 AQUATOX, 기계학습 기반 모델은 개발된 모델의 예측 결과를 바탕으로 단·장기간 실제 하천 조사를 통한 검증을 수행하여 모델의 예측 정확도를 보완할 수 있어야 함
- [기후변화 대응] 수생태계 모델은 조사시기와 동일한(혹은 유사한) 시기의 지리적, 물리적, 수리·수문적, 화학적 변수를 수생태와 연결하는 데이터 변수로 사용하게 됨. 기후 변화와 같은 장기 이벤트에 대한 영향을 평가하고 예측하기 위하여 입력 변수를 조정할 수 있는 기계학습 기반 모델의 경우 시간을 고려한 입력 변수를 추가할 수 있음. 예를 들면 조사일 이전 30일간 강수량 누적량, 탁도의 누적량, 급변한 유량 변화 횟수, 가뭄 기간 등을 입력 자료로 활용하여 장기 동향을 변수로 사용하여 기후변화 영향을 추정할 수 있을 것으로 기대됨

○ 다중모델 기반 복합 예측 및 적용성 확대

- [교란 대응] 기계학습 모델 모의의 경우 전국 단위 모델 개발 뿐만 아니라 지역 및 유역 단위로 보정 및 부분 재학습을 통하여 여러 유역 및 특정 지역에 적용할 수 있도록 신뢰도 강화 전략이 필요함. 모델 구축이 복잡해질수록 변수에 따른 영향을 추정하기가 어려워지기 때문에 현재 고려되고 있는 기계학습 기반 모델과 HABITAT모델 연계, 종분포 모델과 기계학습 기반 모델 연계와 같이 모델을 조합하여 예측 안정성을 확보하고, 예측값의 신뢰성을 높여야 함
- [기후변화 대응] 기후변화에 따른 생태계 영향은 불확실성이 크지만, 다중모델 모의를

통하여 취약지를 선별하여 선제적으로 관리해야 함. 예를 들어 기계학습 기반 모델에서 수생태계 건강성이 낮은 지역이지만 종 분포 모델에서 특정 종이 서식하기 유리한 지역이라면 해당 지역은 지류 연결성 개선, 서식공간 확충 등의 적응 조치를 선제적으로 취하여 생물종 건강성 저하를 방지하는 관리가 필요함

○ 참조하천 관리 강화 및 모델 입력자료로서 활용성 강화

- 국립환경과학원에서는 수생태계 복원 표준모델 정립을 위하여 참조하천 140개를 선정하여 관리카드를 작성하여 관리하고 있음.[20] 참조하천은 인위적 영향이 없거나 아주 적어서 수생태계 건강성을 유지하는 하천으로써 생태하천 복원사업을 진행할 때 목표로 설정할 수 있음
- 이러한 데이터는 한국형 RIVPACS모델(KRIMPAS)의 입력 자료로 확장 가능하며, 하천 복원 사업 수행 시 정량적인 목표를 설정하고 이행력을 평가할 수 있는 공식 평가 도구로써 활용 가능성을 검토할 수 있음. 특히 모니터링 인력과 예산이 부족한 지자체에서는 KRIMPAS O/E 지표를 참고하여 우선 관리하천을 선별하도록 권장할 수 있음

○ 기계학습 기반 예측 모델의 원인-결과 해석 능력 강화

- 박배경 외(2023, pp.5-8)에서는 환경교란이 수생태계에 미치는 영향 해석 및 예측을 위하여 기계학습 기반의 수생태 모델을 구축하고 있음. 기계학습 기반 모델은 다양한 입력변수와 출력변수를 활용할 수 있어 수생태계 건강성 평가지수를 예측하는 데 유용하지만, 훈련데이터 범위를 넘어서는 환경 조건에서는 예측 정확도가 현저하게 떨어질 가능성이 높음. 또한 기계학습 기반 예측 모델의 가장 큰 한계점은 원인-결과를 설명할 수 없는 경우가 많음
- 그래서 수생태계 건강성 평가지수(FAI, BMI)뿐 만 아니라, 지수에 사용하는 종 다양성, 어류의 민감종수, 국내종수 등 지수 산정에 사용하는 메트릭 별 변수를 출력변수로 사용하여 원인-결과 설명 및 예측 안정성을 확보할 필요가 있음
- 또한 SHAP나 LIME 등 설명 가능한 모델 통합 적용을 통하여 어떤 변수가 출력값에 큰 영향을 미치는지 확인할 수 있어야 함
  - SHAP(SHapley Additive exPlanations): 어떤 예측 결과에 대하여 각 변수가 결과에 얼마나 기여했는지 정량적으로 표현할 수 있음. 다양한 모델에서 작동 가능하며, 시각적으로 변수 영향력 순위를 보여줌

20) 국립환경과학원(2024), pp.1-314.

- LIME(Local Interpretable Model-agnostic Explanations): 특정 예측값에 대하여 모델의 인근(Local)에서 선형 모델로 근사하여 설명을 제공하며, 모델에 무관하게 적용할 수 있음

○ 수생태계 예측모델의 제도적 활용 의무화

- 중요한 사업(댐 건설, 하천정비 등)이나 생태하천복원사업에서 물리적 서식처 평가 모델을 제외한 수생태계 예측 모델을 적용하여 계획을 수립하는 사례는 없으므로, 사업 설계 단계에서 수생태계 모델 활용을 의무화하는 방안을 검토해야함. 예를 들어, 댐 건설 사전환경성 검토에 RIVPACS나 AQUATOX 모의 결과를 첨부하여 영향을 선제적으로 평가하도록 유인할 수 있어야 함. 하지만 이를 위하여 접근성과 모의가 용이하도록 GIS 기반 통합 플랫폼을 구축하거나 GUI 기반의 모델을 구축해야 하며, 사업에 따른 비교 분석이 가능하도록 기초자료 축적을 지원할 수 있어야 함
- 사업 시 수행하는 환경영향평가 및 기초자료 조사 예산 확충 및 국비 지원 가능성 검토 필요
- 또한 적용성 검토 단계에서 특정 하천을 대상으로 RIVPACS 모의, 물리적 서식처 모델, 기계학습 기반 모델 등 적용 가능한 모델을 적용하여 그 경향이 유사한 결과로 수렴하는지 검토할 필요가 있음. 모델의 결괏값은 절댓값이라 할 수 없으므로 상대적 추세 및 우선순위 판단 근거로 해석하여 의사결정을 위한 보조적 수단으로 사용할 수 있어야 함

○ 기계학습 기반 조기경보 시스템 도입

- 예를 들어 전국 유역에 대한 기상 예보, 댐 방류계획, 오염원 정보를 실시간으로 받으면, 기계학습 모델이 향후 1년간 건강성 등급 변화를 예측하여 위험 수계 경보를 발령하고 조사를 확대하거나 대응체계를 수립하는 일련의 과정이 필요함

○ 연구 간 연계 강화

- 현재 국가 R&D 사업과 국립환경과학원에서는 유역-수질-수생태계(PHABSIM, AQUATOX, 기계학습 기반 모델 등)를 연계하고 모델 개발 및 고도화를 수행하고 있으나, 연구자 간 방법론 및 결과 공유가 제한적임
- 개발 중인 모델 소개나 워크샵 뿐 만 아니라, 연구결과의 자료 및 해석체계, 적용 조건 등을 공유 가능한 형식으로 정리하고, 사업 간 연구방법 및 연구결과를 통합검토할 수 있는 기반 필요

# 참고문헌

## [국내문헌]


강성룡 외(2022),「기후변화 대응 기반 마련 국가 생물다양성 평가」, 국립생태원, p112.

강형식(2010),「어류의 물리적 서식적합도지수 산정방안 고찰」, 한국환경정책·평가연구원, p.10.

건국대학교(2021),「유역환경변화를 고려한 생태유량 취약성 평가 및 수질-수문-수생태 연계기술 개발 연차보고서」, KEITI, pp.1-235.

경희대학교(2021),「정수생태계 건강성평가 방법 및 변화예측 모델 개발 연차보고서」, KEITI, pp.1-220.

고병건 외, 신지윤, 차윤경(2021), "베이지안 최적화를 통한 저서성 대형무척추동물 종분포모델 개발",「Journal of Korean Society of Water and Wastewater」, 35(4), 대한상하수도학회, pp.259-275.

국립환경과학원(2024),「수생태 복원 표준모델 정립을 위한 참조하천 자료집」, pp.1-314.

국립환경과학원(2023a),「수생태계 건강성 훼손원인 진단을 위한 표준절차서」, pp.1-19.

국립환경과학원(2023b),「하천별 훼손원인 진단 결과 및 복원방향 자료집」, pp.1-58.

국립환경과학원(2019),「차세대 수질수생태계 예측모델 개발 및 적용성 평가(Ⅱ) 수환경-수생태 모델 연계 기능 강화를 중심으로」, p.6.

국립환경과학원(2016),「생물측정망 조사 및 평가지침 개정」, p.137.

김용원 외, 변상돈, 박진석, 우소영, 김소영(2021), "PHABSIM과 SWAT을 이용한 연계모델링 적용성 평가",「한국수자원학회지 논문집」, 54(10), pp.819-833.

노경범 외, 박성천, 진영훈, 박명옥(2011), "River2D 모델을 이용한 섬진강의 생태유지유량 산정에 관한 연구",「한국물환경학회지」, 27(6), pp.822-829.

서울시립대학교(2024),「디지털 트윈 수생태 모델 구축 및 시범적용(Ⅰ) 최종보고서」, 국립환경과학원, pp.33-35.

심태용 외, 배은혜, 정진호(2016), "어류 분포에 미치는 기후변화 영향 평가를 위한 서식적합성 모형 적용",「Ecology and Resilient Infrastructure」, 3(2), 응용생태공학회, pp.134-142.

박배경 외(2023),「Digital Twin Korea-Water 수생태 부문 예측 다중모델 개발 연구(Ⅱ): 국내 하천 맞춤형 수생태 모델 선정구축(1/2)」, 국립환경과학원, pp.5-8.

박영석, 구경아(2022), “수생태계 먹이망 모델 고찰”, 「Korean Journal of Ecology and Environment」, 55(4), p.264.

우소영 외, 정충길, 김진욱, 김성준(2018), “SWAT 및 random forest를 이용한 기후변화에 따른 한강유역의 수생태계 건강성 지수 영향 평가”, 「한국수자원학회지 논문집」, 31, pp.863-874.

이다영 외, 이대성, 민중혁, 박영석(2023), “저서성 대형무척추동물을 이용한 RIVPACS 유형의 하천생태계 건강성 평가법 국내 하천 적용성”, 「Korean Journal of Ecology and Environment」, 56(1), pp.45-56.

이서로 외, 이관재, 배주현, 박운지, 김종건, 임경재(2023), “GAN 알고리즘의 적용을 통한 수생태계 건강성 등급 예측 머신러닝 모델 성능 향상 연구”, 「한국농공학회 학술대회」,p.106.

이현석 외(2018),「환경생태유량 대표지점 유량산정 및 검증 평가(Ⅰ)」, 국립환경과학원, p.5, p.11.

임혜정 외, 나은혜, 전형철, 송호진, 유호준, 황순홍, 류희성(2021), “생물서식지 적합성 평가를 위한 Delft3D와 HABITAT 모델의 연계 적용”, 「한국물환경학회지」, 37(3), pp.217-228.

정진호, 배은혜(2015), “기후변화에 따른 금강 유역의 어류 종분포 변화 예측”, 「Ecology and Resilient Infrastructure」, 2(3), pp.198-205.

최병웅 외(2020),「서식처 조사 및 모델링을 통한 영산강 수생태 건강성 개선 방안 연구(Ⅰ)」, 국립환경과학원, p.2.

한국환경정책·평가연구원(2021),「부문별 기후변화 영향 및 취약성 통합평가 모형 기반구축 및 활용기술 개발 최종보고서」, KEITI, p.34.

환경부(2024a),「물환경측정망 설치·운영 계획」, p.7.

환경부(2024b),「제3차 물환경관리기본계획 기본구상」, p.49.

## [국외문헌]

Abbasi, Tasneem and S. A. Abbasi(2011), “Water Quality Indices based on Bioassessment: The Biotic Indices”, *Journal of Water and Health*, 9(2), pp.331.

Byeon et al.(2018), “Review of CLIMEX and MaxEnt for Studying Species Distribution in South Korea”, *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*, 11(3), pp.325-333.

Beck, L. et al.(2005), “Considerations for the Use of Soil Ecological Classification & Assessment Concepts in Soil Protection”, *Ecotoxicology and Environmental Safety*,

62(2), p.196.

Christensen and Walters(2004), "Ecopath with Ecosim: Methods, Capabilities and Limitations", *Ecological Modelling*, 172(2-4), pp.109-139.

FISRWG(2001), *Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices*, pp. 1-3.

Jung et al.(2016), "Insect Distribution in Response to Climate Change based on a Model: Review of Function and Use of CLIMEX", *Entomological Research*, 46(4), pp.223 -235.

Min, J. et al.(2023), "Optimization of the Korean River Macroinvertebrate Prediction and Assessment System (KRIMPAS) for the Biological Assessment of Rivers", *Journal of Freshwater Ecology,* 38(1): 2251508.

Kim, S. Y. et al.(2024), "The Effect of Climate Change on Indicator Wetland Insects: Predicting the Current and Future Distribution of Two Giant Water Bugs (Hemiptera: Belostomatidae) in South Korea", *Insects*, 15(10), 820.

Kim, Z. et al.(2020), "Predicting the Impact of Climate Change on Freshwater Fish Distribution by Incorporating Water Flow Rate and Quality Variables", *Sustainability*, 12(23), 10001.

Park, Clough(2014), *AQUATOX (RELEASE 3.1 Plus) Modeling Environmental Fate and Ecological Effects in Aquatic Ecosystems, Vol. 2, Technical Documentation*, EPA, p.2.

Phillips, S. J. et al.(2006), "Maximum Entropy Modeling of Species Geographic Distributions", *Ecological Modelling*, 190(3-4), pp.231-259.

FRESHWATER BIOLOGICAL ASSOCIATION(2023), *RIVER Invertebrate Classification T ool(RICT2) User Guide*, p.20.

Sengupta, A. et al.(2023), *MDBA/CSIRO Ecosystem Functions Project*, Australia's National Science Agency, pp.1-28.

Ward, J. V. and J. A. Stanford(1983), "The Serial Discontinuity Concept of Lotic Eco systems, Dynamics of Lotic Ecosystems", *Ann Arbor Science*, p.38.

Ward, J. V. and J. A. Stanford(1995), "The Serial Discontinuity Concept: Extending the

Model to Floodplain River", *River Research and Applications*, 10(2-4), pp.159-168.

Wright, J. F.(2000), "An Introduction to RIVPACS", *Assessing the Biological Quality of Fresh Waters: RIVPACS and other Techniques*, Freshwater Biological Association, pp.1-24.

[온라인 자료]

연합뉴스(2022.6.2), "봄 가뭄에 타들어 가는 하천", https://www.yna.co.kr/view/PYH20220602202500013, 검색일: 2025.5.30.

세계일보(2024.7.29), "폭우로 대전 3대하천 범람하자 준설 논란 재점화 '준설로 물그릇 키워야' vs '하천 횡단구조물 제거'", https://www.segye.com/newsView/20240729512692, 검색일: 2025.5.30.

ConservationBytes.com(2020.7.21), "History of Species Distribution Models", https://conservationbytes.com/2020/07/21/history-of-species-distribution-models/, 검색일: 2025.5.31.

EPA(2025.1.16), "AQUATOX Features and Tools", https://www.epa.gov/hydrowq/aquatox-features-and-tools, 검색일: 2025.5.19.

FRESHWATER BIOLOGICAL ASSOCIATION(2025.3.24), "RIVER Invertebrate Classification Tool(RICT)", https://www.fba.org.uk/rivpacs-and-rict/river-invertebrate-classification-tool, 검색일: 2025.5.31.

USGS(2012.7.9), "Physical Habitat Simulation(PHABSIM) Software for Windows", https://www.usgs.gov/node/279289, 검색일: 2025.5.24.

※ 본 책자는 환경표지 인증을 받은 용지로 인쇄되었습니다.


# 하천 수생태계 건강성 예측모델 비교분석 연구

KEI 한국환경연구원
Korea Environment Institute

(30147) 세종특별자치시 시청대로 370 세종국책연구단지 B동
전화 044-415-7777 팩스 044-415-7799 www.kei.re.kr

95530
9 791159 806995
ISBN 979-11-5980-699-5