

## 통합 물환경 관리를 위한 개방형 모델링 플랫폼 고찰

이성학<sup>1b</sup> · 신창민<sup>2</sup> · 이용석<sup>3</sup> · 조재필<sup>1a,†</sup>

<sup>1</sup>유역통합관리연구원 · <sup>2</sup>국립환경과학원 물환경연구부 물환경평가연구과 · <sup>3</sup>한림성심대학교 보건환경과

### A Review of Open Modeling Platform Towards Integrated Water Environmental Management

Sunghack Lee<sup>1b</sup> · Changmin Shin<sup>2</sup> · Yongseok Lee<sup>3</sup> · Jaepil Cho<sup>1a,†</sup>

<sup>1</sup>Convergence Laboratory for Watershed Management, Integrated Watershed Management Institute

<sup>2</sup>Water Quality Assessment Research Division, National Institute of Environment Research

<sup>3</sup>Department of Health and Environment, Hallym Polytechnic University

(Received 18 September 2020, Revised 09 October 2020, Accepted 16 November 2020)

#### Abstract

A modeling system that can consider the overall water environment and be used to integrate hydrology, water quality, and aquatic ecosystem on a watershed scale is essential to support decision-making in integrated water resources management (IWRM). In adapting imported models for evaluating the unique water environment in Korea, a platform perspective is becoming increasingly important. In this study, a modeling platform is defined as an ecosystem that continuously grows and provides sustainable values through voluntary participation- and interaction- of all stakeholders- not only experts related to model development, but also model users and decision-makers. We assessed the conceptual values provided by the IWRM modeling platform in terms of openness, transparency, scalability, and sustainability. We also reviewed the technical aspects of functional and spatial integrations in terms of socio-economic factors and user-centered multi-scale climate-forecast information. Based on those conceptual and technical aspects, we evaluated potential modeling platforms such as Source, FREEWAT, Object Modeling System (OMS), OpenMI, Community Surface-Dynamics Modeling System (CSDMS), and HydroShare. Among them, CSDMS most closely approached the values suggested in model development and offered a basic standard for easy integration of existing models using different program languages. HydroShare showed potential for sharing modeling results with the transparency expected by model user-s. Therefore, we believe that can be used as a reference in development of a modeling platform appropriate for managing the unique integrated water environment in Korea.

**Key words** : IWRM, Modeling platform, Open-source, Watershed, Web-based service

<sup>1a,†</sup> Corresponding author, 소장(Director), jpcho89@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-1369-1002

<sup>1b</sup> 부연구위원(Senior Researcher), hacktan73@gmail.com, https://orcid.org/0000-0002-4161-0978

<sup>2</sup> 연구관(Senior Researcher), cmshin77@korea.kr, https://orcid.org/0000-0002-8970-6039

<sup>3</sup> 교수(Professor), yslee@hsc.ac.kr, https://orcid.org/0000-0002-3769-7708

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

## 1. Introduction

물관리 일원화와 관련하여 가속화되고 있는 통합물관리(integrated water resources management, IWRM)는 공간적 관점에서 하천 중심의 선적 개념에서 유역 중심의 면적 개념을 도입하고 유역 중심의 물관리체계로 전환 되어야 한다(Choi, 2018). 내용적인 관점에서는 유역의 여건을 반영한 건강성 확보 차원에서 수질과 수량의 통합, 경제·사회·환경적 측면을 고려한 수요-개발-재해 연계 관리, 구조적·비구조적 혁신기반의 효율적 물관리 등이 고려되고(OECD, 2016), 물관리 거버넌스 중심의 이해당사자 참여 및 유역 단위의 재정적 책임성을 중심으로 하는 수요 관리를 포함하여 지속 가능한 방향으로 통합물관리가 고려될 예정이다.

통합물환경 관리 모델링 플랫폼은 통합물관리 실행에 필요한 유역 내 수문, 수질, 수생태 등 다양한 분야의 모델을 연계하여 통합적으로 평가할 수 있어야 한다(Argent et al., 1999). 또한, 유역 내 다양한 프로세스를 연계하여 모델링하는 과정에서 공간적 개념에서의 수평 및 수직적 연계성이 고려되어야 한다. 이와 같은 통합 물환경 관리를 위한 모델링 플랫폼은 개발 및 유지관리에 드는 비용과 노력으로 인하여 주로 선진국을 중심으로 개발 및 적용되어왔고, 국내에서 개발되어 국내의 다양한 유역 환경에서 검증될 필요가 있는 모델은 찾아보기 힘들다.

기존의 국내 유역 모델링은 해외에서 개발된 다양한 모델을 유역 특성이 상이한 국내에 도입한 후 적용성 평가를 통해 활용하는 접근이 주를 이루고 있어 국내만의 특수한 상황을 고려하는 경우 어려움이 존재한다. 또한, 모델 사용자들은 대상 지역의 상황을 반영하기 위해 필요한 방대한 자료를 획득하여 입력자료의 포맷에 맞게 변환하고 관측자료와의 비교를 통한 모형 매개변수의 보정 및 검증에 많은 시간을 사용하고 있다. 이는 기존에 타 연구자에 의해 구축된 모형의 전 과정을 재현해 보는 것이 어렵고 필요에 따라 내용 추가를 위해 요구되는 자료의 수집 또한 쉽지 않은 상황에 기인한다. 이로 인하여 동일한 유역에 동일한 모형을 적용하더라도 모형 사용자의 숙련도에 따라서 서로 다른 모델 분석 결과가 도출될 가능성이 높아지게 된다. 이처럼 처음 모형 구축을 위한 초기 비용이 크고, 기존에 구축된 모델링 자료를 재활용하기 어려운 상황에서 기존의 연구 성과를 기반으로 모델링 결과의 질적 향상을 기대하기 어렵다.

모델링 결과를 의사결정 과정에 활용하는 데 있어서도 모델링 전 과정의 복잡성과 방대한 모델의 입력자료 및 매개변수, 그리고 출력자료로 인하여 모델링 전과정의 적절성 및 결과에 대한 동료 전문가들을 통한 검증 또한 어려운 상황이며 이는 모델링 결과를 활용하는 데 있어서 신뢰성 관점에서의 제한 요소로 작용하고 있다.

따라서 본 연구에서는 향후 국내 통합물관리를 추진해 가는 과정에서 국내 유역특성을 반영하면서 다양한 유역 내 컴포넌트들 사이의 연계성을 고려할 수 있는 모델링 체계를 구축하고 생산되는 모델링 결과의 재활용과 상호 검증을 통한 신뢰성 확보 차원에서 필요한 물환경 모델링 체계를 다양한

이해당사자들이 참여가 가능한 개방형 플랫폼 관점에서 고찰함으로써 향후 국내 통합 물환경 모델링 체계의 방향성을 제시하고자 한다.

## 2. Definition and directions of modeling platform

### 2.1 플랫폼의 필요성 및 정의

플랫폼(platform)이라는 용어는 최근 10년 동안 다양한 분야에서 다양한 의미로 활용되고 있다. 따라서 국내 수자원 관련 분야에서 사용되어 온 플랫폼의 의미를 살펴보고 통합 물환경 모델링 관점에서의 현재 상황을 고려하여 플랫폼을 정의하는 것이 필요하다.

Weon (2018)은 환경 관리 도메인·서비스(시스템) 간 연계성 단절로 인한 재해 발생 시 대처 능력 저하와 중복 투자의 과다 발생으로 인한 낮은 실효성 문제를 해결하기 위해 스마트형 환경재해 관리 서비스 플랫폼을 제안하였다. 이는 환경 관련 대기·물·토양·기상 등 40 여개 서비스의 센서 및 계측정보 데이터 프로토콜의 표준화를 포함한 서비스 플랫폼 개발을 통해 다양한 환경 변화를 실시간적으로 감지하고 주변 상황을 자율적으로 판단하여 복합 환경재해에 대응할 수 있는 것을 목적으로 한다. 수재해 관리를 위한 정보 플랫폼과 관련하여 Kim and Jeong (2015)은 통합 관리를 위해 데이터 표준화의 중요성을 강조하고 공간정보 중심의 국외 상황에 대한 고찰을 통해, 수재해 정보 플랫폼에 필요한 6개 목표 시스템(기초정보, 분석정보, 주제도 제공, 국가재난 정보 제공, 증강현실, 오픈정보 제공 시스템)을 제안하였다. Yeon et al. (2014)은 정부의 공공데이터 포털을 통해 개방된 정보를 공간정보 오픈플랫폼에서 활용하기 위해 자료의 수집 및 재가공을 위한 연계 서버 구축에 있어서 공공데이터 표준화의 필요성을 제시하였다. Song et al. (2015)은 환경영향 평가를 위해 공간정보 오픈 플랫폼인 Vworld의 오픈API 서비스 기능을 활용한 사례 제시를 통해 평가서의 신뢰도 향상을 통한 환경지리정보서비스시스템(EIAGIS)의 기능 개선 가능성을 제시하였다. Chang et al. (2009)은 국토정보 서비스 개발에 있어서 사용자 참여가 가능한 개방형 인터페이스 기반을 통한 핵심 기술 개발 사례를 보여주었다. 이처럼, 국내의 플랫폼 관련 연구는 공간정보를 포함한 공공 데이터의 활용 관점에서 진행되었고 통합을 위한 표준화의 중요성에 대한 중요성이 인식되어 있다. 하지만 데이터를 활용하여 통합 물환경 관리 목적의 다양한 분석을 수행하기 위해 필요한 모델링 관점의 플랫폼에 대한 연구는 미흡한 실정이다.

모델링 플랫폼의 정의를 위해 국내 통합 물환경 모델링 관련 현황을 살펴 볼 때, 분야별 다양한 모형들이 활용되고 있으나 대부분 해외에서 개발된 모형들을 국내에 적용하고 있다. 또한 모델링 과정에서 입력자료 생산, 모형 구동, 결과의 분석에 많은 시간과 노력을 요구하는 이유로 정작 국내의 특수한 상황들을 모형에 반영하는 과정은 소홀하게 다루지고 있다. 특히 유역 중심의 통합물관리를 위해 수요가 증가하고 있는 도메인 간의 연계를 고려한 통합 모델링 관점의 접근은 부족한 상황이다. 모델링 결과는 학술 논문 및 보고서 형태

로 일반에 공개되고 있으나, 모델링 관련 자료들은 제외되고 결과 위주로만 공개되고 있고, 모델링 과정의 복잡성으로 인하여 모델링의 세부 사항에 대해 동료 전문가의 제 3자적 검증이 어려운 상황이다. 이와 같은 폐쇄적인 환경은 다른 연구자가 동일한 대상 지역에 대해 동일한 모형을 적용하여 연구를 수행하는 데 있어서 기존에 많은 노력과 시간을 들여 구축한 모델링 관련 자료들을 재활용하기 어렵게 하며, 매번 초기 비용이 높은 모형구축 과정에서 요구되는 비슷한 절차를 반복하게 된다. 이로 인하여 모델링 과정에서 대상 유역 특성에 대한 이해를 바탕으로 중요 기작을 반영하는데 많은 시간과 노력을 기울이지 못하고 있으며, 이는 모델링 결과의 신뢰성과 활용성에 있어서 제한 요소로 작용되고 있다.

따라서 다양한 도메인 간의 기능적인 연계성과 이를 고려한 모델링 기반 정보의 생산 및 공유와 관련하여 다양한 이해당사자들의 상호 연결성을 통합 물환경 모델링 플랫폼의 첫 번째 가치로 고려하였으며, 자발적이고 지속적인 참여를 통한 확장성을 두 번째 핵심 가치로 고려하였다. 통합 물환경 모델링 플랫폼은 우선 다양한 물환경 도메인에서 단편적으로 이뤄지고 있는 모델링을 시·공간적 관점뿐만 아니라 기능 관점에서의 양방향의 연계를 바탕으로 유역 중심의 통합물관리의 의사결정에 활용될 수 있는 시스템을 의미한다. 또한 모델링 플랫폼이 공급자 중심의 정적인 일방향 시스템과 비교하여 차별성을 갖기 위해서는 다양한 레벨의 공급자와 사용자 사이의 연결을 가능케하는 기반으로써 당사자들이 자발적이고 적극적으로 지속적으로 참여할 수 있는 양방향 가치 체계의 구축이 필요하다. 이는 모델링 플랫폼을 중심으로 다양한 이해당사자들에 대한 공급자와 사용자 관점에서의 명확한 구분과 플랫폼을 통해 상호 공유될 수 있는 가치에 대한 구체적인 정의가 필요하다. 이를 위해서 모델링 플랫폼을 한국의 상황에 적합한 물환경 평가 모델링 개발과 개발된 모형의 적용과 의사결정 과정에서의 활용 등 두 개의 영역으로 구분하여 살펴보고자 한다. 모델 개발 관점에서는 모델 개발자와 모델 사용자 모두 전문적인 지식을 요구하며, 모델링 결과의 활용 관점에서는 전문적인 지식을 필요로 하는 모델 사용자가 공급자로서 참여하고 유역 내 의사결정 과정에서 비전문적인 이해당사자들은 사용자로서 참여가 보장되어야 한다. 플랫폼의 확장성은 언급된 데이터 및 상이한 모델 간의 연계를 위한 인터페이스 표준화 등이 기술적인 관점에서 중요하게 고려되어야 하며, 이해당사자들의 자발적인 참여를 통한 플랫폼의 확장을 위해서는 제공한 가치에 상응하는 보상 체계가 합리적으로 설계될 필요가 있다.

따라서 물환경 모델링 플랫폼은 유역 내 주요 컴포넌트 사이의 연계성을 고려할 수 있는 국내 상황에 적합한 모형의 개발, 적용, 그리고 생산된 정보의 의사결정에서의 활용 과정에서 전문가/비전문가 수준의 다양한 이해당사자들의 자발적인 참여와 상호작용을 통해 모두에게 양방향의 가치를 제공해 주며 기술적인 기능의 확장을 포함하여 지속적으로 성장해 갈 수 있는 생태계로 정의하고자 한다. 따라서 실질적인 물환경 모델링 플랫폼 관련 국내외 동향을 살펴보기 전에 통합 모델링 플랫폼을 통해 어떠한 기능적인 연계성이 고려되

어야 할지와 이해당사자들의 상호 연결성을 지속적으로 유지하기 위해서 플랫폼이 고려해야 할 개념적 가치를 살펴보았다.

## 2.2 플랫폼의 개념적 방향성

### 2.2.1 개방성

다양한 이해당사자의 참여를 보장하기 위해서는 플랫폼의 개방성(openness)이 중요하게 고려되어야 한다. 모델 개발 관점에서는 물 관련 다양한 도메인의 모델 개발자들이 참여를 통해 개발된 소스코드를 공유할 수 있어야 하며 공유된 코드를 기반으로 다른 개발자들에 의해 자유롭게 수정되고 재활용되는 것이 필요하다. 최근에 많은 소프트웨어들이 소스 코드가 공개되어 있으며 자유롭게 사용, 복제, 수정이 가능한 오픈소스(open source) 소프트웨어를 사용하여 개발되고 있다. 하지만 오픈소스 소프트웨어를 활용하여 복제 또는 수정하는 경우에도 적용된 라이선스에 따라서 재배포가 결정되며 Table 1에서와 같이 개방성 관점에서 차이를 보일 수 있다.

제시된 모든 오픈소스 라이선스들은 공통적으로 어떤 프로그램이 특정 소프트웨어를 개발할 때 발생하는 저작권과 관련하여 소스코드 내 원 개발자 정보를 임의로 수정하거나 삭제하여서는 안되며, 소프트웨어를 사용할 때 해당 오픈소스 소프트웨어가 사용되었음을 명시적으로 표기하는 것을 의무사항으로 채택하고 있다.

소스코드 공개와 관련하여, General Public License (GPL) 2.0의 경우, 소프트웨어를 수정하거나 라이브러리와 같이 수정된 소프트웨어를 링크시키는 경우 GPL에 의해 소스 코드를 제공해야 한다. 또한 실행 파일 형태로 소프트웨어를 배포하는 경우, 소스 코드 그 자체를 함께 배포하거나 소스코드를 제공받을 수 있는 방법에 대한 정보도 함께 제공해야 한다. Lesser General Public License (LGPL) 2.1은 오픈소스 소프트웨어의 사용을 장려하기 위한 전략적인 차원에서 마련되었으며, LGPL Library의 일부를 수정하는 경우 수정한 Library를 LGPL에 의해 소스코드를 공개하여야 한다. 다만 LGPL Library에 응용프로그램을 링크시킬 경우 해당 응용프로그램의 소스를 공개할 필요가 없다는 점이 GPL과 가장 큰 차이점이다. Mozilla Public License (MPL)의 경우 GPL과의 가장 큰 차이점은 MPL 코드와 다른 코드를 결합하여 프로그램을 만들 경우 MPL 코드를 제외한 결합 프로그램에 대한 소스코드는 공개할 필요가 없으며, 소스코드를 적절한 형태로 제공하는 경우, 실행 파일에 대한 라이선스는 MPL이 아닌 다른 형태로 선택이 가능하다.

Berkeley Software Distribution (BSD) 라이선스는 미국 정부에서 제공한 재원으로 운영되었기 때문에 BSD 라이선스는 소스코드 공개의 의무가 없다는 점이 GPL과의 차이점 중 가장 중요한 사항이다. Apache 라이선스는 BSD 라이선스와 비슷하여 소스코드 공개 등의 의무가 발생하지 않으며, 특허권에 관한 내용이 포함되어 BSD 라이선스보다는 좀 더 법적으로 완결된 내용을 담고 있다. MIT 라이선스는 MIT 라이선스를 따르는 소프트웨어를 사용하여 개발하는 경우 소스

**Table 1.** Degree of openness for six major open-source licenses. (modified from Lin et al., 2006)

Licenses	The source code is provided when the original program is redistributed	The source code must be provided when a modification is distributed	A modification should be distributed under the same license as the original program	The program can be sublicensed	Collection of royalties is allowed when a program is distributed	Degree of openness
GPL	Yes(+)	Yes(+)	Yes(+)	No(+)	No(+)	5
LGPL	Yes(+)	Yes(+)	Yes(+)	No(+)	No(+)	5
MPL	Yes(+)	Yes(+)	Yes(+)	Yes(-)	No(+)	4
BSD	No(-)	No(-)	No(-)	No(+)	Yes(-)	1
Apache (2.0)	No(-)	No(-)	No(-)	No(+)	Yes(-)	1
MIT	No(-)	No(-)	No(-)	Yes(-)	Yes(-)	0

(+): higher degree of openness; (-): lower degree of openness

코드 공개 의무도 없으며 제품을 오픈소스로 해야 할 필요도 없다.

**2.2.2 투명성**

플랫폼이 지속적으로 성장해 가기 위해서는 플랫폼에 참여하는 이해당사자들의 기여 정도뿐만 아니라 공유되는 정보에 대한 가치 평가가 왜곡 없이 투명하게 공유되어야 한다. 우선 모델 개발 관점에서 살펴보면 다수의 개발자 참여를 통해 모형이 개발되어 개선되어 가는 과정에 개발자별로 어떤 부분에 대한 기여가 있었는지에 대해 전 과정을 추적 가능해야 한다. 모델링 결과의 활용 측면에서 투명성을 확보하기 위해서는 제공된 모델링 관련 입출력 자료 및 매개변수를 이용하여 제3의 사용자가 동일한 결과를 얻을 수 있도록 재현성 평가가 가능한 기능 제공이 필요하며 (Chawanda et al., 2020), 개선에 있어서도 소스코드 관리와 마찬가지로 변경된 내용에 대한 이력 관리가 필요하다.

모델 개발 관점의 투명성 확보를 위해서는 모형 소스코드의 공유와 이에 따른 버전관리가 중요하게 고려되어야 한다. 오픈소스 SW 개발에 있어 버전제어시스템 (version control system, VCS)은 개발자들이 효과적으로 공동 작업 할 수 있도록 하는 협업 프레임워크를 지원하므로 매우 유용하다. 이는 VCS를 이용하여 소스 코드를 관리하고 프로젝트를 통해 생산된 모든 코드의 버전을 유지할 수 있도록 지원하므로 프로젝트 개발 중에 많은 소프트웨어 개발자가 사용하고 있다 (Zolkifli et al., 2018). VCS에는 중앙 집중식 버전 제어 시스템 (centralized VCS, CVCS)과 분산형 버전 제어 시스템 (distributed VCS, DCVS)의 두 가지 접근 방식이 있다. CVCS는 중앙 저장소가 하나인 중앙 집중식 모델로써 가장 일반적으로 사용되는 CVCS 도구로는 Subversion이 대표적이다. 반면 DCVS는 중앙 저장소가 없는 분산 모델이지만 모든 사용자들은 로컬저장소를 갖고 있으며 Git이 대표적이다. DVCS 도구의 출현 이후, 많은 소프트웨어 개발 프로젝트가 소스코드 저장소를 CVCS에서 DVCS로 이동하였다.

Github는 Git 기반의 서비스 중에서 의심할 여지 없이 가장 많이 활용되고 있는 도구이다. 이와 같이 오픈소스 프로젝트는 VCS를 통해 소스 코드를 공개하기 때문에 다양한 개발자에 의해 검증되고 개선될 수 있다. 이러한 장점 때문에

현재 해외의 주요 소프트웨어 기업들도 오픈소스 소프트웨어의 활용을 지원하고 있고 미국과 유럽을 포함한 여러 국가에서 정부 차원의 오픈소스 기술 도입을 지원하고 있다(Yoo et al., 2013). Github를 통해 공개된 저장소에 대한 사용자들의 평가는 별점으로 파악할 수 있으며, 얼마나 많은 개발자들이 공개된 저장소를 기반으로 수정한 후 다시 원코드에 반영하였는지와 어떤 부분을 누가 언제 수정하였는지에 대한 정보들을 Github 플랫폼을 통해 쉽게 파악할 수 있다. 2020년 8월 현재 Github에서 Hydrology 및 Water quality를 키워드로 검색된 저장소(repository)는 각각 720 및 1309개이며 언어별 사용빈도는 그림과 같으며, Python과 R이 가장 많이 사용된 것으로 나타났다.

모델링 결과의 활용 관점에서는 모델링 결과의 공유는 HydroShare (Tarboton et al., 2014)의 SWATShare와 같이 시도되고 있으나 아직은 소스코드 공유와 비교하여 매우 미흡한 상황이다. 하지만 유역 중심의 통합물관리의 의사결정 과정에서의 모델링 결과의 활용성을 고려할 때, 모델링 전문가에 의해 제시된 분석 결과가 신뢰받고 활용되기 위해서는 기술적 평가를 수행할 수 있는 제3의 전문가뿐만 아니라 모니터링 및 수자원 관리 관련자, 정책 및 의사결정권자 등과 같은 유역 내 다양한 이해 관계자의 참여가 중요하다.

**2.2.3 확장성**

통합 모델링 플랫폼 관점에서의 확장성은 새로운 자료 및 기능적 모듈을 기존의 플랫폼에 공유하는 경우 얼마나 쉽게 플랫폼에 추가될 수 있는지와 관련하여 연계성 확보를 위한 표준화가 중요하게 고려되어야 한다. 모델링 플랫폼은 크게 다양한 기관에서 제공되는 자료를 모델링에 활용하기 위해 필요한 데이터 표준과 서로 다른 모델 간의 기능적 연계를 위한 모델링 인터페이스 표준이 고려되어야 한다.

물 관련 분야에서 데이터의 수신, 가공, 배포 등에 대한 수요가 증가하고 있어 데이터 관련 국제 표준의 중요성이 강조되고 있다. 유역 중심의 통합 모델링 관점에서는 공간정보가 필수적이며 이와 관련된 국제 표준으로는 Open Geospatial Consortium (OGC)에서 개발 제정하는 표준이 있다. 모델링 인터페이스 표준은 기존의 다양한 모델 개발 환경을 인정해주는 정도에 따라서 개방형 표준과 폐쇄형 표준으로 구분 가

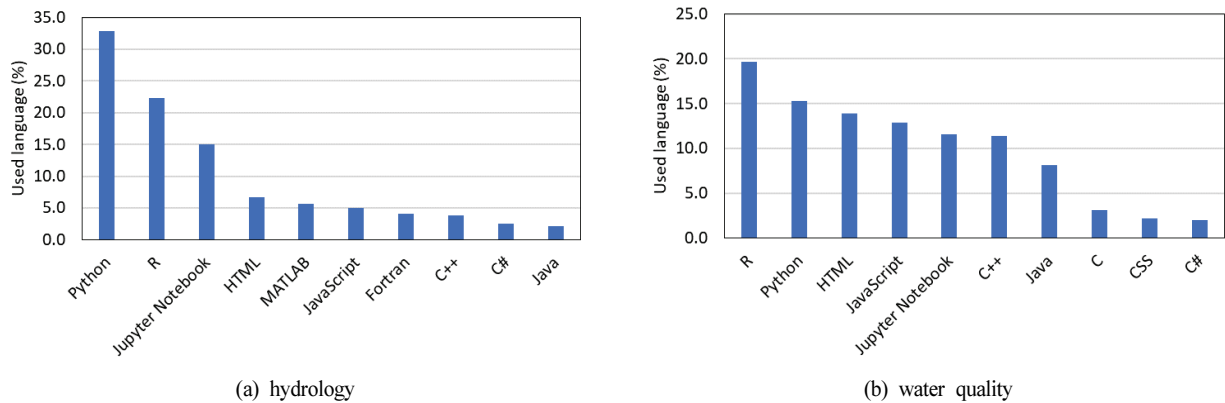


Fig. 1. Ranking of selected program languages in GitHub repositories searched for hydrology and water quality as keywords.

능하다. 개방형 표준은 기존에 독립적으로 개발된 모델들의 상호연동을 위해 모델 개발에 사용된 기존의 프로그램 언어와 코드를 최대한 인정하는 표준화 접근 방식이다. 반면 폐쇄적인 표준은 모듈 간 상호연계를 위한 모델링 인터페이스 환경을 정해 놓고 연계를 위한 모듈들의 개발을 지정된 환경에 맞춰 개발하는 접근 방식이다. 다음 장에서 비교할 모델링 플랫폼들 중에서 OpenMI(Gregersen et al., 2007) 및 CSDMS(Peckham et al., 2013)의 경우는 개방형 표준에 포함되며, Source(eWater, 2019), FREEWAT(Filippis et al., 2017), OMS (David et al., 2013) 등은 폐쇄형 표준에 포함된다.

## 2.2.4 지속가능성

모델링 생태계가 지속적으로 성장해 가기 위해서는 자발적 참여자들의 기여에 대하여 왜곡 없이 가치를 인정해 줄 수 있는 평가체계가 필요하며, 기여의 정도 및 사용자들의 평가를 기반으로 이에 대한 적절한 보상이 제공될 필요가 있다. 개인 또는 기업에 의해 상용 소프트웨어로 개발되는 경우에는 판매를 통한 경제적인 보상이 따르게 되지만, 개발된 소프트웨어를 플랫폼을 통해 무료로 제공하는 경우에도 커뮤니티에서의 평가를 바탕으로 경제적인 보상이 아니더라도 기여에 상응하는 적절한 보상이 고려될 필요가 있다.

새로운 모델 개발에 오픈소스 기반의 SW를 활용하는 경우 공개된 소스 코드를 무료로 사용할 수 있으므로 개발 기간 단축과 비용 절감의 효과를 얻을 수 있지만, 사용 소프트웨어에 규정되어 있는 오픈소스 소프트웨어 라이선스를 준수하지 못하는 경우 발생할 수 있는 법적 책임과 위험 또한 지속가능성 관점에서 고려되어야 한다. 오픈소스 관련 설문 조사에서 국외의 경우 라이선스의 법적인 문제가 오픈소스의 도입을 방해하는 3번째 중요 요소로 선정된 반면, 국내에서는 설문 응답자 중 다수가 오픈소스를 사용하고 있음에도 라이선스의 중요성을 인식하지 못하고 있을 뿐만 아니라 라이선스 규정에 대한 이해도 역시 낮은 것으로 조사되었다(Yoo et al., 2013). 이에 최근 “오픈소스 소프트웨어 라이선스” 위반 문제를 해결하기 위해 오픈소스 소프트웨어 라이선스 규정 준수 플랫폼 서비스가 개발되어 활용되고 있으며, 이는

개발 중에 있는 소스코드를 분석하여 라이선스 충돌여부를 검사한 후 충돌 방지를 위한 오픈소스 소프트웨어를 추천해주는 기능을 수행한다(Chun et al., 2020).

## 2.3 플랫폼의 기술적 방향성

### 2.3.1 기능적 통합성

통합 물관리는 수량, 수질, 재해 관리 등 물 관련 업무를 환경부에서 일괄적으로 추진하는 물관리 일원화를 통해 추진되고 있다. 이는 수량과 수질에 더하여 재해 및 수생태 등을 통합적으로 고려하여 유역 내 물이용 효율성 및 물순환 건강성 확보를 이루는 것을 목적으로 하고 있으며, 이를 위해서는 유역 내에서 기능적 통합성을 고려할 수 있는 모델링 체계가 필요하다. 기능적 통합은 목적에 적합한 다양한 기능별 기존 모형들의 느슨한 커플링을 통해 고려되고 있다(Cho et al., 2010; Jung et al., 2011; Kang et al., 2011; Kim et al., 2011). 우선 모형 사이의 연계는 시간 규모에 따라 장기 모의가 가능한 모형들과 강우 사상에 대한 모의가 가능한 모형들 그룹 안에서의 연계가 주로 이뤄지고 있다.

국내에 도입된 이후 많은 적용사례를 갖고 있는 Soil & Water Assessment Tool (SWAT) 및 Hydrological Simulation Program - FORTRAN (HSPF)와 같은 유역모형들은 기본적으로 수량 및 수질을 동시에 고려할 수 있는 기능을 포함하고 있다. 하지만 보다 상세한 유역 내 프로세스를 고려할 필요가 있는 경우에는 필지 규모 또는 하천 모형들과의 연계가 고려되고 있다(Jung et al., 2011; Kang et al., 2011). 이는 유역모형을 중심으로 하천 또는 하구역 등과의 공간적 통합성을 고려하기 위한 경우와 유역 내 영농관리와 같은 인위적 활동을 고려하기 위한 경우 등과 같이 추가적인 기능이 필요한 경우 연계 모델링 접근이 적용되고 있다. 특히 통합물관리는 양적·질적 관점에서의 중요성을 고려할 때 궁극적으로 농업수자원을 포함하여 진행되어야 한다. 전체 수자원 사용량의 50% 이상을 차지하는 농업용수의 경우 농업용 저수지와 같은 시설물들이 전국에 산재 되어 있으며, 실제 용수 공급량은 농업인들이 선택하는 물관리 기법에 따라 영향을 받는다. 따라서 시설재배지 또는 수도작과 같은 영농형태 및 재배 작물에 따른 필요수량의 수량 및 수질 관점의 변동성의

경우 농업수리시설물들의 유역 내 공간적 연계성과 영농활동을 고려하여 평가되어야 한다. 또한 수질적인 관점에서도 농경지에 뿌리는 비료 및 농약의 경우 유출 특성에 따라서 오염원으로 작용할 수 있어 이와 관련된 유역 규모에서의 순환 기작이 기능적 통합성 관점에서 고려될 필요가 있다.

### 2.3.2 공간적 통합성

통합물관리는 공간적 관점에서 하천 중심의 선적 개념에서 유역 중심의 면적 개념의 도입을 통한 유역관리체계 확립을 기반으로 진행될 예정이다. 이는 유역 내의 공간적인 연계성을 3차원적으로 고려해야 할 필요가 있음을 의미한다.

유역 중심의 통합물관리를 위해서는 유역 내 지형, 토지이용 및 토양의 공간적 분포뿐만 아니라 강우에 의해 유역 내에 떨어진 물이 최종적으로 유역 출구를 빠져나가기 까지 발생할 수 있는 모든 경로 및 이와 연관된 중요 기작들이 모델링에 반영되어야 할 필요가 있다. 이는 기상·수량·수질 관측소의 위치, 댐·보·저수지 등 수리시설물의 위치, 하수처리시설의 위치 등 유역 내에서의 공간적인 분포와 연계성이 중요하게 고려되어야 한다. 이와 같은 이유로 전 세계적으로 활용되고 있는 모형들의 경우 모형 구동을 위해 방대한 공간 정보를 처리하기 위한 전처리와 모델링 결과를 공간적인 관점에서 표출해 주고 추가적인 분석을 수행하기 위한 후처리 기능을 포함한 GIS 및 DB 기반의 사용자 인터페이스를 제공하고 있다(U. S. EPA, 2019).

유역 중심의 수량·수질 통합 평가에 있어서 SWAT 및 HSPF 유역 규모 모형들은 유역 내 토지에 발생하는 물과 오염물질의 하천으로의 유입과 하천 내 기작을 적당한 수준에서 모의한다. 유역 모형들은 필지 규모 모형들과 비교할 때 자세한 영농기법 및 작물생육을 고려하는 데 한계가 있으며, 동역학적 하천 모형들과 비교할 때에는 하천 내 수리학적인 거동을 모의하지 못하는 한계를 가지고 있다. 따라서 유역 중심의 모델링 과정에서 상세한 유역 내 기작이 고려될 필요가 있는 경우에는 필지 규모 모형 또는 하천 모형들과의 연계가 고려되고 있다. 필지규모 모형과의 통합은 농업비점오염을 유역 규모에서 평가하기 위한 SWAT-APEX 연계 모델링이 있으며(Jung et al., 2011), 후자로는 낙동강 유역에서의 SWAT-EFDC 연계 모델링(Kang et al., 2011) 등을 예로 들 수 있다.

지표수-지하수 연계 모델링은 제주도와 같이 유출 특성이 내륙과 상이하여 일반적인 유역유출 모형으로 해석이 어려운 경우(Kim et al., 2009)와 수자원의 수요와 공급이 불균형인 유역에서 유역 내 지표수와 지하수를 단일 체계로 통합 운영함으로써 수자원의 가용량 증대를 통한 용수공급의 안정성 확보를 위한 경우(Kim et al., 2011) 등에 고려되어 왔다. 도시화에 따른 지하수 함양량의 감소뿐만 아니라 시설재배 면적의 증가와 수막재배에 따른 지하수 사용량의 증가 등은 하천 유량의 변화에 영향을 주고 있어 유역 내에서 수직적 연계를 고려한 통합 모델링 접근이 필요하다(Chang and Chung, 2014).

### 2.3.3 사회수문학 연계성

상충되는 이해 관계자의 가치, 경쟁 목표, 다수의 의사 결정자, 제한된 자원, 높은 불확실성이 존재하는 복잡한 문제 등에 더하여 인간 활동을 포함한 인적요소는 통합물관리를 위한 모델링의 현실적 활용에 있어서 해결해야 하는 어려움 중의 하나이다(Badham et al., 2019). 향후 통합물관리는 국가 주도의 공급조절 중심의 하향식 접근에 더하여 유역 내 거버넌스를 통한 주민 참여를 기반으로 하는 수요조절 중심의 상향식 접근을 병행할 필요가 있다. 예를 들어 농업용수 구역에서의 모델링 기반 공급량과 실제 공급량 사이에 많은 차이를 보이는 것은 실제 영농기법을 적용하는 주체인 농업인들과 농업용수 관리자들의 인문사회학적 요소를 고려하지 못하는 것에서 기인한다(Elinor, 2011). 따라서 통합물관리 관점에서 인간을 포함한 인문사회학적 요소와 유역 내 수량, 수질, 수생태 등 다양한 물리적 기작들 사이의 동적인 연계가 고려되어야 한다. 국내의 경우 사회수문학은 외국 사례의 소개를 통한 개념 소개와 단편적인 적용이 시도되고 있는 상황이어서(Kim and Jeong, 2015) 향후 통합물관리에 있어서 참여를 기반으로 하는 수요조절이 중요하게 고려되어야 하는 부분을 중심으로 인문사회학적 요소를 반영해 갈 필요가 있다.

### 2.3.4 다중규모 기후 정보 연계

최근 기후변화에 따른 강우 및 기온 등의 기후변동성이 증가함에 따라서 기후변화 시나리오 뿐 만 아니라 다양한 시간 규모의 예측정보의 활용이 유역 중심의 통합물관리 과정에 고려될 필요가 있다. Cho et al. (2018)은 사용자 중심의 기후서비스 요소로서 의사결정 과정에서의 다중규모 기후정보 활용을 강조한 바 있다. 통합물관리 관점의 기후변화 적응은 기후변화 시나리오 전망 자료를 활용하여 변화에 오랜 기간이 소요되는 대책을 마련하는 것도 중요하게 고려해야 하지만, 기후변화에 따른 기후 변동성 증가로 인해 당장 발생하는 극한 이상기후에 대해서도 선제적으로 대응을 하는 접근을 포함하여 고려될 필요가 있다. 현재 환경부에서는 실시간 관측정보 및 기상 예측정보를 활용하여 4대강 주요 지점에 대한 현업적 조류예보를 HSPF-EFDC 모델링 연계를 통해 수행하고 있다(Na et al., 2014). 최근 기후변화에 따른 가뭄 및 홍수 등 이상기후 발생 빈도와 강도가 증가해 가고 있는 상황에서 실시간 자료에 더하여 목적에 맞는 다양한 시간 규모의 예측정보를 활용하여 의사결정에 활용될 수 있도록 기후정보의 시공간적 상세화를 포함한 연계성이 모델링 플랫폼에서 고려될 필요가 있다.

## 3. Platform perspective on existing water environment modeling systems

### 3.1 Source

2000년대 초반 호주에서는 모델 개발자의 선택에 따라 프로그래밍 언어, 컴퓨터 플랫폼 및 설계방식 등이 다양하게

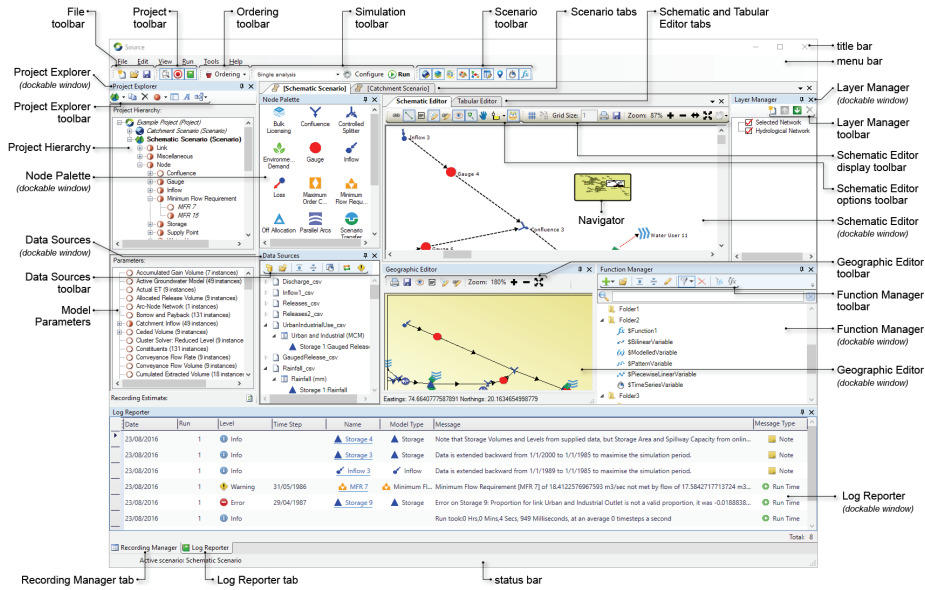


Fig. 2. User interface of Source (eWater, 2020).

선택적으로 활용되어 왔으며(Searle and Penton, 2012). 이에 따라 모델의 통합과 중복 개발을 피하기 위해 물환경 모델 개발에 적합한 모델링 개발환경의 필요성이 대두되었다.

물환경 모델링 환경 개발을 위하여 호주 내 모델 개발자 대상의 사용자 수요조사를 실시하고(Marston et al., 2002) 이를 바탕으로 TIME (the invisible modelling environment)의 개발을 시작하였다. TIME은 닷넷(.NET) 기반의 모델 개발 플랫폼으로 모델 알고리즘의 개발, 검증 및 실행 가능한 애플리케이션 개발을 지원한다(Rahman et al., 2005). TIME은 모델 개발 연구자가 컴포넌트 기반 모델 개발을 위한 사용자 편의 기능과 모델 개발 연구자 대상의 TIME 기반 모델 개발 교육을 통하여 호주의 환경, 생태, 농업, 수문 및 수리 등의 다양 분야에서 컴포넌트 기반 모델의 개발을 지원하였다(Searle and Penton, 2012).

Source는 TIME을 통하여 개발된 컴포넌트 기반 모델을 이용하여 유역단위 적용에 필요한 모델간 연계 구성, 입력자료 구성, 모델 최적화, 모델링 결과 시각화 등의 기능을 구현한 플랫폼으로, 유역단위 통합수자원관리 실행을 위하여 물환경의 통합적인 평가, 계획, 관리에 필요한 수문·환경·생태 모델링 연계를 지원하며, 2018년 호주의 국가 수문 모델링 플랫폼으로 선정되었다(eWater, 2019).

Source와 TIME은 호주 내의 모델개발을 지원하기 위한 도구로 개발되었으며, 개발이 완료된 후에는 국외에 플랫폼의 공급과 교육을 무료의 오픈소스가 아닌 상용화 관점에서 보급하고 있다(eWater, 2019). Source 플랫폼을 이용하여 유역 통합물관리에 적용하기 위해서는 TIME기반으로 개발된 단위모델을 이용하며, 사용자가 플러그인(plug-in) 형태로 모델을 개발하여 Source에 탑재할 수 있다(Kim et al., 2011) TIME과 Source는 .NET 기반 C#으로 개발되었으며, C#외에 닷넷 프레임워크에서 지원하는 프로그래밍 언어(비주얼베이직, 포트란, C++)를 통합하여 이용할 수 있다(Meyer, 2001).

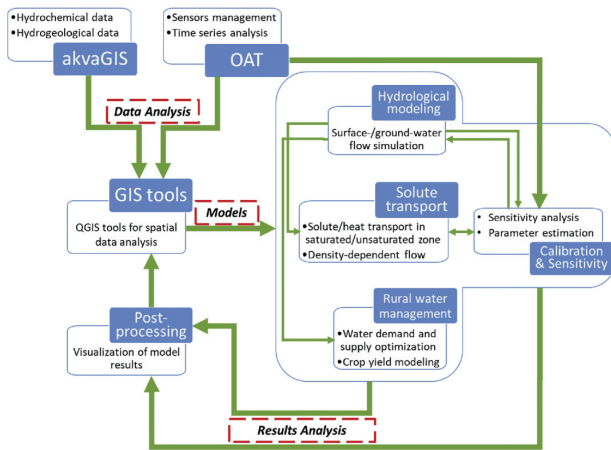
Source에서 유역 단위 모델링을 위해 단위모델의 조합과 연계를 통하여 다양한 분야의 모델을 조합할 수 있으며, 이는 TIME을 이용한 단위모델 개발과정에서 각 단위모델의 데이터와 기능(function)에 관한 인터페이스 표준을 따르기 때문이다. 따라서 유출분석과 같은 단위모델에서부터 수문-수질-생태 연계와 같은 다양한 크기의 모델로 확장이 가능하다.

Source의 지속적인 개발과 관리는 eWater에서 담당하고 있으며, Source의 확산을 위하여 동남아시아 국가와 인도를 중심으로 교육프로그램을 개발하여 실시하고 있다. 또한 웹사이트를 통하여 커뮤니티를 운영하고 있으며, 여기서는 Source의 운영에 필요한 관련 모델, 데이터, 플러그인 등에 관한 자료를 제공하고 있다(eWater, 2020).

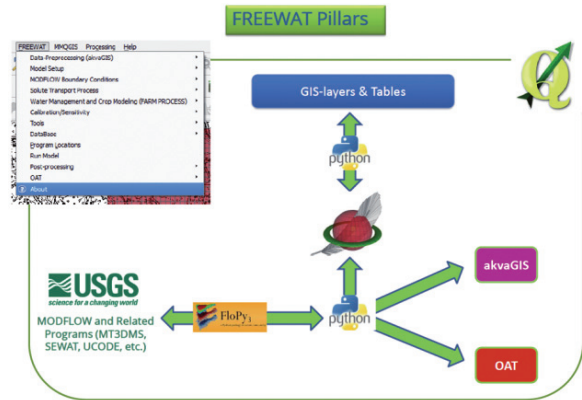
### 3.2 FREEWAT (FREE and open source tools for WATER resource management)

FREEWAT은 WATER INNOVATION : BOOSTING ITS VALUE FOR EUROPE 이라는 이름으로 EU 위원회에서 자금을 지원 하는 HORIZON 2020 프로젝트이며, 무료 오픈소스 GIS 데스크톱 소프트웨어인 QGIS의 플러그인으로 개발된 오픈소스 기반의 통합 모델링 플랫폼이다 (Rossetto et al., 2017). FREEWAT QGIS 플러그인은 Windows 및 Linux OS 환경에서 설치하여 사용할 수 있으며, 오픈소스 SW의 GPL 2.0 라이선스를 기반으로 소스코드는 분산형 VCS인 Git 기반의 GitLab 서비스를 통해 공유되고 있다.) FREEWAT 아키텍처는 1) SpatialLite 관계형 데이터베이스 관리 시스템, 2) 현장 데이터 전처리를 위한 전용 도구, 3) 수문학 프로세스 시뮬레이션을 위한 기존 무료 및 오픈소스 시뮬레이션 코드, 4) 모델 결과의 후처리를 위한 전용 도구 등과 같이 다양한 소프트웨어 도구의 통합을 기반으로 한다(Rossetto et al.,

1) <https://gitlab.com/freewat/freewat>



(a) Relationships among the different tools in FREEWAT (Rossetto et al., 2018)



(b) FREEWAT platform pillars (Filippis et al., 2017)

Fig. 3. Tools and pillars of FREEWAT platform.

2018)(Fig. 3-a). 이러한 도구들의 상호 연결은 FloPy 라이브러리를 포함하여 Python 프로그래밍 언어를 통해 수행된다 (Filippis et al., 2017)(Fig. 3-b).

FREEWAT는 지하수 관련 프로세스를 고려하여 물관리 문제를 처리하기 위한 여러 모듈들이 포함되어 있으며 이는 지하수 흐름 모델링을 위한 MODFLOW 및 지하수 용질의 흐름 모의를 위한 MT3D와 같이 USGS의 제품군이 플러그인의 기초를 이루고 있다(Koltsida and Kallioras, 2019; Rossetto et al., 2018). 지표수-지하수 연계 모델링을 위한 전처리 모듈로는 시계열 관측자료 분석을 위한 Observation Analysis Tool (OAT) 모듈 (Cannata and Neumann, 2017)과 수문지질 데이터의 분석, 해석 및 시각화를 위한 도구로써 AkvaGIS 모듈 (Criollo et al., 2019)이 포함되어 있으며, UCODE 기반의 민감도 분석 및 보정을 위한 모듈도 포함되어 있다. FREEWAT의 적용은 현재 수자원 관리를 위한 물 기본 지침, 지하수 지침 및 기타 물 관련 지침의 요구 사항을 충족하기 위한 적용과 농촌 환경과 관련된 물 관리 문제를 해결하기 위한 적용 등 두 가지 영역에서 전체 14 개의 선택된 사례 연구를 통해 적용되고 있다. 통합적 모델링의 기능적 관점으로는 지표수와 지하수 연계를 고려한 모델링을 중심으로 FREEWAT 플랫폼에 농장 프로세스 및 작물 성장 모듈의 연계도 고려하고 있다 (Rossetto, et al., 2019).

### 3.3 OMS (Object Modeling System)

OMS는 환경 모델의 개발, 데이터 제공, 검증, 배포를 위한 플랫폼이다. OMS는 2000년대 초반 Modular Modeling System(MMS)(Leavesley et al., 2006)의 설계 방식을 이용하여 개발이 시작되었다. MMS는 C/Motif로 개발되었으며, 재사용 가능한 환경 모델링 플랫폼으로 분포형 유역유출모델인 Precipitation-Runoff Modeling System(PRMS) (Leavesley et al., 1983) 모델에 기원을 두고 있다. PRMS는 포트란 (FORTRAN) 코드로 작성되었으며, 이를 MMS의 핵심기술

을 이용하여 JAVA 프로그래밍 언어를 이용하여 재구축 한 것이 OMS1 (Ahuja et al., 2005)이다.

OMS1은 시계열 데이터의 교환과 관리에 중점을 둔 철차형 시스템이었으며, 간단한 사용자 인터페이스를 가지고 있었다. OMS2는 2004년에 발표되었으며, 2008년 USDA-Natural Resources Conservation Service (USDA-NRCS)의 시스템에 통합되었다. OMS2에서는 Java NetBeans™ 기술을 기반으로 개발되었으며, 프로젝트관리, 데이터 시각화, 매개변수 관리, 시각적 모델 빌드 기능을 가지고 있다. OMS3은 웹기반의 서비스 배포와 다른 통합 개발 환경과 호환이 가능한 경량 플랫폼을 목표로 개발되었다(David et al., 2010).

OMS3은 컴포넌트 기반 모델링 기능을 강화하였으며, 이를 통하여 멀티쓰레딩, 기존 시스템 호환성 및 시스템 확장성을 증대시키고자 하였다. 이를 위하여 모델 실행을 위한 DSL(domain specific language)를 적용하였다. DSL은 프로그래밍 언어가 일반성을 추구하는 것과는 대조적으로 특정 분야의 모델이나 문제를 해결하기 위해 사용되는 프로그래밍 언어나 명세 언어를 말한다(Deursen, 1997; Deursen et al., 2000).

OMS3에서 모델링은 컴포넌트 실행 바이너리, 모델 매개변수 및 입력자료, 결과 파일 출력방법, 성능 평가 방법으로 구성된다. 모델의 실행에 필요한 모든 정보는 DSL파일에 저장되며, OMS3 플랫폼 내에서 실행된다. OMS3는 DSL을 통하여 모델과 플랫폼간의 최소한의 의존성을 구현하였다 (Lloyd et al., 2011).

OMS3는 소스코드 및 문서관리 도구인 codeBeamer<sup>2)</sup>에 모델에 관한 설명과 사용방법 및 소스코드가 공개되어 있으며, OMS Work Group이 OMS3의 주요한 기능 개선 및 새로운 버전 배포를 담당하고 있으며, 일반 사용자들은 버그 리포팅을 통하여 개선에 참여할 수 있다.

2) <https://alm.engr.colostate.edu/cb/project/oms>



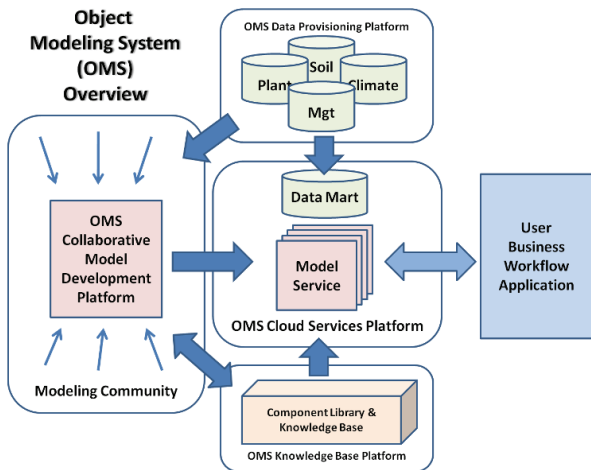


Fig. 4. Overview of Object Modeling System(OMS)(OMS, 2020).

3.4 OpenMI(Open Modeling Interface)

OpenMI는 수문 모델 실행 시 모델, 데이터베이스, 분석 및 시각화 프로그램 간 데이터 교환을 위한 개방형 모델링 인터페이스 표준이며, 여러 분야에서 개발된 독립적인 모델링 컴포넌트 간 상호연동을 목표로 한다(OGC, 2014).

유럽에서는 각국의 환경에 따라 다양한 수문모델을 개발하여 활용하고 있었으며, 통합수자원관리의 구현을 위해서는 각국에서 기존에 사용되고 있던 모델의 연계 필요성이 대두되었다(Buahin and Horsburgh, 2018). 이에 유럽집행위원회는 2001년 수문학 관련 모델의 연계를 단순화하는 유럽 개방형 모델링 인터페이스를 개발하고 구현하기 위해 HarmonIT라는 연구프로젝트를 시작하였다(Gijsbers et al., 2005). 2005년 HatmonIT 프로젝트는 첫 번째 OpenMI 표준 버전 1.4을 발표하였으며(Harpham et al., 2019), 실제 문제에 적용하고 이를 검증하기 위하여 유럽위원회의 지원으로 OpenMi-Life 프로젝트에서 OpenMI 2.0 버전을 발표하였다(Moore and Tindall, 2005). 현재는 OpenMI의 보급 촉진을 위하여 OpenMI Association을 설립하여 운영하고 있다.

OpenMI는 개방형 인터페이스 표준을 추구하며, 2014년 Open Geospatial Consortium(OGC®)에 표준으로 등록되어 OGC 웹사이트(OGC, 2014)에 공개되고 있다. OpenMI 표준은 일련의 소프트웨어 인터페이스로 정의할 수 있으며, 기존에 개발된 모델, 분석 도구, 시각화 도구 등과 상호 연동할 수 있는 방법을 제시한다. OpenMI를 이용한 모델간의 상호연동을 위해서는 각 모델이 OGC OpenMI 표준에 따른 Wrapper 인터페이스를 추가적으로 구현하여야 한다.

OpenMI 2.0에서는 C# 및 JAVA기반 언어를 지원하며, OpenMI의 소스코드는 1.4 및 2.0 버전이 Sourceforge에 개방되어 있어 사용자가 자유롭게 접근하여 활용할 수 있다(<http://sourceforge.net/projects/openmi>). 또한 라이선스 정책은 GNU Library or Lesser General Public License Version 2.0 (LGPLv2), MIT License를 따른다(OGC, 2014).

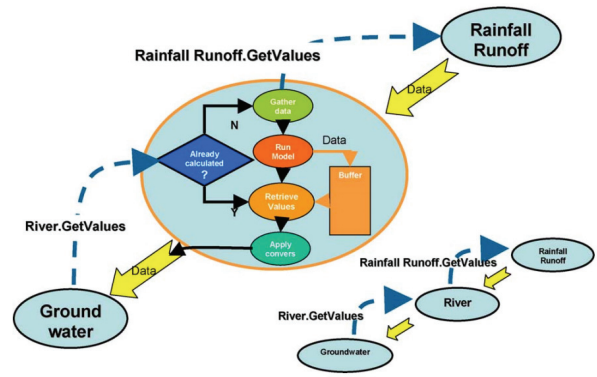


Fig. 5. Data linkage among components in OpenMI (OGC, 2014).

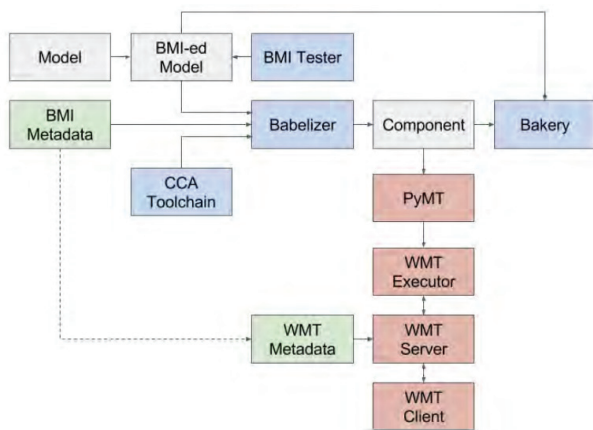
3.5 CSDMS(Community Surface Dynamics Modeling System)

미국 CSDMS (Syvitski et al., 2014)는 지표동역학모델의 개발 및 상호연계를 위한 컴포넌트 기반 모델 개발 플랫폼<sup>3)</sup>이며, 미국연구재단(national science foundation)의 지원으로 미국 콜로라도대학이 주축이 되어 개발해 오고 있다. CSDMS는 모델 개발, 지원, 배포에 있어 모델 공유, 모델연계 표준, 모델 개발도구 배포를 통한 모델간 상호연계, 중복 개발 방지, 재사용을 목적으로 하고 있다(Peckham et al., 2013).

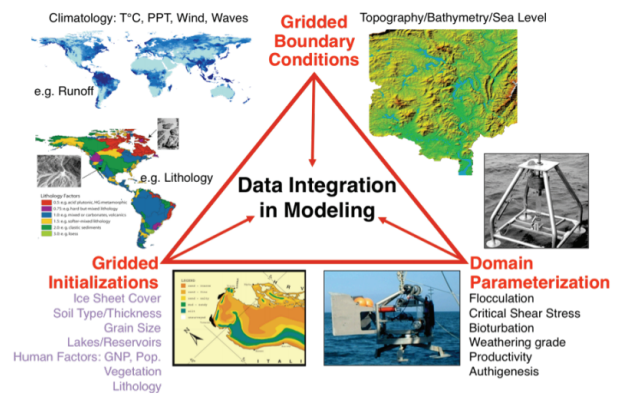
CSDMS는 모델 간 상호연계를 위하여 표준과 개발도구를 제공하고 있으며, 모델 간 상호연계를 위하여 모델 개발 시에 준수하여야 하는 표준인 BMI (basic model interface), 모델의 상호연계와 실행을 위한 도구인 pymt(python modeling toolkit) 그리고 모델의 편리한 개발을 위하여 모델 개발자가 활용할 수 있는 도구인 Modeling Tools를 제공하고 있다(Hutton et al., 2014).

BMI는 모델의 상태를 조정하거나 접근하는데 필요한 함수의 집합이며, 모델 연계를 위하여 컴포넌트 단위의 모델 개발에 있어 지켜야 하는 표준규약이다. BMI는 모든 언어로 작성할 수 있지만 현재는 C, C ++, Fortran 및 Python의 네 가지 언어를 지원한다(Hutton et al., 2020). pymt는 BMI 표준을 준수하는 모델의 상호연계 및 실행을 위한 오픈소스 파이썬 패키지이다. pymt는 BMI를 기반으로 개발된 모델 패키지를 포함하고 있으며, BMI 준수 모델 간의 데이터 교환, 연계 모델간의 계산순서 및 계산 간격 조정, 플러그인 모델의 관리 등을 수행한다(Peckham et al., 2013). pymt는 CSDMS에서 개발하여 배포하는 모델과 사용자 개발 모델로 구분할 수 있으며, 사용자 개발 모델은 BMI 표준을 만족하도록 작성하여 플러그인 형태로 기존 모델과 연계하여 사용하게 된다. CSDMS에서 제공하는 모델링 툴은 BMI 빌더, 표준 부합성 테스트 도구, CSDMS 표준 네이밍 도구(standard names registry)(Peckham et al., 2013), 웹기반 모델링 도구인 WMT(web-based modeling tool) 등으로 구성되어 있다. 이

3) <https://csdms.colorado.edu>



(a) A flow diagram describing steps to transform a model into a CSDMS



(b) Data integration in modeling of CSDMS

Fig. 6. Model and data integration scheme of CSDMS(CSDMS, 2020).

도구들은 모델 개발의 편의를 위한 도구들이다(Overeem et al., 2013).

CSDMS에서는 모델의 사용을 위한 배포, 저자, 모델 명세, 모델 호환성, 설명자료에 관한 정보를 Model Repository를 통하여 제공하고 있으며, 모델의 버전 관리 및 소스 공개는 Github를 이용하며, 이를 통하여 모델의 투명성을 추구하고 있다. CSDMS에서 개발하여 배포되는 BMI, pyMT, Modeling Tools 또한 소스가 공개되어 배포되고 있으며, Github에서 이를 확인할 수 있다.4)

### 3.6 HydroShare

HydroShare는 수문 과학 발전을 위한 대학 컨소시엄(CUAHSI)에서 운영하는 웹기반 수문 정보 제공 시스템(Tarboton et al., 2014)으로, 사용자가 데이터와 모델을 다양하고 유연한 형식으로 공유한다. HydroShare에는 데이터 및 모델을 위한 저장공간과 데이터 및 모델에서 작동할 수 있는 도구가 포함되어있어 사용자에게 클라우드 컴퓨팅 기능을 제공한다.

HydroShare는 미국 national science foundation (NSF)의 지원을 통하여 지속적으로 개발되고 있으며, 미국의 주요 수문 관련 기관 및 대학들이 참여하고 있다(Tarboton et al., 2014). 오픈소스를 기반으로 구축되어 있으며, HydroShare의 소스코드는 Github의 저장소를 활용하여 공동으로 개발되고 있다. Github의 코드사용은 BSD 라이선스 정책을 따른다(HydroShare, 2020)

HydroShare는 초기에는 특정 데이터 형식만을 지원하였으나 현재는 여러 가지 다른 포맷의 데이터 형식을 지원하며, Open Archives Initiative Object Reuse 및 Exchange 표준 또는 OAI-ORE(Lagoze et al., 2008)를 기반으로 하는 공식 데이터 모델을 사용하여 구성되어 있다(Horsburgh et al., 2016). HydroShare에서 데이터와 모델은 영구적으로 게시하

고 인용 가능한 디지털객체식별자(DOI)를 부여한다. 또한 수문학 연구를 위해 다른 사람들과 협업할 수 있도록 소셜미디어와 유사한 커뮤니케이션 기능을 제공한다(Horsburgh, et al., 2016).

HydroShare에서는 데이터 리소스와 연계하여 시각화, 분석 등을 할 수 있는 다양한 웹 어플리케이션을 제공하고 있다. 제공되는 앱은 간단한 데이터 편집기에서 MATLAB, SWATShare, OPeNDAP, EPA WATERS 앱, CUASHI JupyterHub 등의 전문적인 앱을 포함한다(Morsy et al., 2017).

HydroShare는 수문학 전문가들의 협업 모델링을 지원하기 위하여 모델 프로그램, 인스턴스, 그리고 파이썬 기반의 주피터 노트북을 이용한 코드 실행을 지원한다. 따라서 사용자 간 라이브러리 형태 공유를 이용하여 주피터 노트북 기반의 모델 개발이 가능하다. 또한 HydroShare에서 대부분의 데이터는 REST API를 이용하여 제공되므로 사용자는 HydroShare의 리소스와 연계하여 동작할 수 있는 모델을 개발할 수 있다(Gan et al., 2020). 사용자가 모델 공유를 통한 공동개발을 수행하며, 클라우드 시스템, Github 및 JupyterHub 등의 최근의 기술들을 활용한다는 점에서 발전 가능성이 크다고 할 수 있다.

## 4. Conclusion

통합 물환경 모델링 플랫폼을 유역 내 주요 컴포넌트 사이의 연계성 고려하여 모형의 개발, 적용, 그리고 생산된 정보의 의사결정에의 활용 과정에서 다양한 이해당사자들의 자발적인 참여와 상호작용을 통해 양방향의 가치와 기술적 기능 확장을 포함한 지속가능한 모델링 생태계로 정의하였다.

플랫폼이 모델링 생태계로 성장하기 위해 개념적으로는 개방성, 투명성, 확장성 및 지속가능성 관점의 가치를 플랫폼 참여자에게 제공할 수 있어야 한다. 플랫폼은 우선 다양한

4) <https://github.com/csdms>

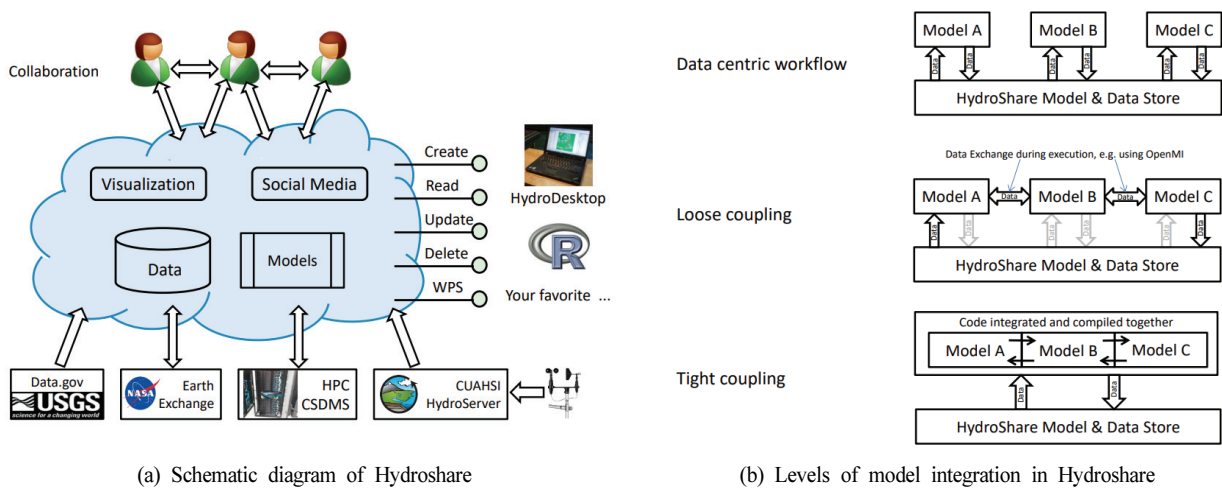


Fig. 7. Model and data sharing structure of Hydroshare(Hydroshare, 2020).

이해당사자의 참여가 가능하도록 프로그램 소스의 공개, 수정 및 재배포와 관련된 개방성이 보장되어야 한다. 투명성은 배포되는 모델 및 데이터에 대하여 신뢰성 확보를 위해 필요하며, 모델 개발 관점에서는 Git과 같은 개방형 플랫폼을 이용한 소스코드 이력 관리가, 모델의 활용 관점에서는 동료 전문가들에 의해 모델링 전 과정이 재현되고 검증될 수 있도록 공유 환경 제공이 중요하게 고려되어야 한다. 확장성은 다양한 기관에서 제공되는 데이터 및 모델들의 플랫폼을 통한 연계 가능 정도이며, 이는 상호교환 가능한 데이터의 표준 및 모델간 인터페이스에 대한 표준 제정 여부가 중요하다. 그리고 지속가능성은 지속 가능한 모델링 생태계 구축을 위하여 담보되어야 하는 자발적 참여자들의 기여에 대한 평가체계이며, 이는 모델링 생태계 내에서의 유형 및 무형의 보상 체계가 마련되어야 함을 의미한다.

통합물환경 모델링 플랫폼은 ICT 기술의 발전과 함께 발전하며, 이는 유역 중심의 수량, 수질, 재해, 수생태 등을 고려한 통합 물환경 관리 과정에서 발생할 수 있는 다양한 기능적 연계를 위한 유연한 플랫폼 기반의 모델링 체계 구축에 도움이 된다. 플랫폼의 기능적 통합성과 더불어 공간적인 통합성, 인간 활동 반영, 다중규모 기상·기후 정보 연계를 플랫폼의 기술적 방향성 관점에서 살펴보았다. 공간적 통합성은 하천 중심의 선적인 개념에서 유역 중심의 면적인 개념으로 확장하는 과정에서 필수적이며, 사회수문학적 고려는 인간 활동을 포함한 인문사회적 요소를 전체 모델링 과정의 동적 요소로 포함하여 고려해야 함을 의미한다. 그리고 다중규모 기후정보 연계는 다양한 시간 규모의 예측정보를 활용하여 의사결정에 활용될 수 있도록 기후정보의 시공간적 상세화를 포함한 사용자 중심의 기후서비스 관점에서 플랫폼에 반영될 필요가 있다.

앞서 제시된 통합물환경 모델링 플랫폼의 개념적 방향성 및 기술적 방향을 통하여 기존에 개발된 시스템을 분석하였다. 분석대상은 대표적으로 미국, 유럽, 호주에서 사용되고 있는 시스템으로 Source, FREEWAT, OMS, OpenMI, CSDMS, HydroShare를 선정하였다. Source는 호주의 국가

수문모델링 플랫폼으로 소스코드가 공개되어 있지 않은 상업용 플랫폼으로 사용자는 플러그인 형태로 모델을 개발하여 탑재할 수 있다. 호주에서 사용되는 다양한 공개 및 상업용 데이터 표준을 지원하며, 기존의 모델을 연계하는 기능은 미흡하다. FREEWAT은 QGIS 플러그인 형태의 무료 오픈소스 기반 통합모델링 플랫폼이다. QGIS에 플러그인 형태로 제작되어 GIS와의 연계가 쉬운 장점을 가지고 있으며, GPL 2.0라이선스를 기반으로 Github를 통하여 소스를 공개하고 있다. OMS는 모듈기반 모델링 방식을 이용하여 모델의 개발, 검증 및 배포를 위한 플랫폼으로 모델의 연계에 도메인 언어인 DSL를 활용한다. codeBeamer를 통하여 오픈소스 기반으로 공개되어 있으며, 라이선스정책은 LPGL2.1을 따른다. OpenMI는 유럽의 기존 모델을 연계하여 모델링하기 위한 표준으로 개발되었다. OpenMI는 모델 연계를 위한 표준이라 할 수 있으며, 이러한 표준에는 모델, 분석도구, 시각화도구의 연동을 포함한다. SourceForge에 OpenMI 2.0버전의 소스코드가 공개되어 있으며, 라이선스 정책은 LPGL2.0을 따른다. 미국에서 개발된 CSDMS는 모델개발, 연계를 위한 pymt와 모델 및 데이터의 공유를 위한 웹시스템으로 구분할 수 있다. CSDMS의 특징은 모델 개발에 있어서의 표준과 공유에 있어 표준을 동시에 제공하고 있다는 점으로 개발된 모델의 배포와 평가에도 중점을 두어 모델링 생태계 형성을 목적으로 개발되어 있다. Github에 소스코드가 공개되어 있으며, BSD 또는 MIT 라이선스 정책을 따르고 있다. HydroShare는 미국의 다양한 대학 및 공공기관이 참여하고 있는 모델 공유 플랫폼으로 수문모델 개발자들을 위한 도구를 제공한다. 앞서 언급된 시스템들이 모델 개발자 중심의 플랫폼으로서의 의미를 갖는 반면 HydroShare는 모델 사용자들에 의해 생산된 모델링 관련 성과를 공유할 수 있는 기능을 제공하고 있다. HydroShare는 BSD 라이선스 정책을 따르고 있다.

다음의 Table 2는 기존에 개발된 모델링 플랫폼에 대하여 개념적 방향성 및 기술적 방향성의 각 항목에 대하여 정리한 것이다. Source의 경우 상업용 소프트웨어로 기능적인 면에

서는 우수하나 개방성 및 참여적인 측면에서는 부족하며, 기존의 모델에 대한 연계 지원은 미흡한 편이다. 그리고 나머지 5개 플랫폼은 오픈소스 플랫폼으로 개방성 및 확장성, 투명성 측면에서는 우수하며, OpenMI의 경우에는 유럽에서 사용되는 기존 모델의 연계에 중점을 두고 있어 모델 개발 용이성 측면에서는 부족하며, HydroShare는 모델의 개발보다 모델의 공유, 배포 및 활용에 중점을 두고 있어 모델 개발 지원이 미흡하다. 아래의 6개의 플랫폼 중 OMS와 CSDMS가 모든 측면에서 우수하다고 할 수 있으며, 모델의 공유와 배포 및 재현을 위한 정보는 CSDMS에서 자세히 제공하고 있어 우수한 편이라고 할 수 있다.

통합물관리의 수행을 위해서는 지역의 상황을 객관적으로 분석하고 이를 이해당사자와 함께 공유할 수 있는 플랫폼이 필수적이다. 본 연구에서는 지역의 다양한 시각을 통합적으로 모델링할 수 있는 물환경 통합 모델링 플랫폼의 의미를 살펴보고 플랫폼의 개념적 방향성과 기술적 방향성 측면에서 분석하고 기존에 개발된 통합물관리 모델링 플랫폼인 Source, FREEWAT, OMS, OpenMI, CSDMS, HyrdoShare에 대하여 분석하였다.

국내에서는 통합물관리 플랫폼에 대한 사용자의 요구와 현재 이용되고있는 분야별 시스템에 대한 조사를 기반으로 국내에 적합한 형태의 플랫폼개발에 관한 논의가 필요하다. 통합물관리 플랫폼의 개발은 장기적인 투자와 여러 분야 연구자들이 참여하는 연구이다. 따라서 플랫폼 개발을 위해서는 관련 기관의 지원이 반드시 선행되어야 하며, 플랫폼 생태계 구축을 위한 노력도 병행되어야 한다. 플랫폼이 개발된 이후에 지속가능한 생태계 구축을 위한 수익모델도 고려되어야 성공할 수 있다. 본 연구를 통하여 향후 국내에 적합한 플랫폼 개발 논의를 활성화하는데 도움이 되기를 바란다.

### Acknowledgement

본 연구는 농촌진흥청 국립농업과학원 연구개발사업(과제 번호: PJ014932)의 지원으로 수행되었습니다.

### References

Ahuja, L. R., Ascough, J. C., and David, O. (2005). Developing developing eveloping natural resource models using the object modeling system: Feasibility and challenges, *Advances in Geosciences*, 4, 29-36. <https://doi.org/10.5194/adgeo-4-29-2005>

Argent R. M., Grayson R. B., and Ewing S. A. (1999). Integrated models for environmental management: Issues of process and design, *EnvironvIRONMENT International*, 25, 693-699.

Badham, J., Elsayah, S., Guillaume, J. H. A., Hamilton, S. H., Hunt, R. J., Jakeman, A. J., Pierce, S. A., Snow, V. O., Babbar-Sebens, M., Fu, B., Gober, P., Hill, M. C., Iwanaga, T., Loucks, D. P., Merritt, W. S., Peckham, S. D., Richmond, A. K., Zare, F., Ames, D., and Bammer, G. (2019). Effective modeling for integrated water resource management: A guide to contextual practices by phases and steps and future opportunities, *Environmental Modelling & Software*, 116, 40-56. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.02.013>

Buahin, C. A., and Horsburgh, J. S. (2018). Advancing the Open Modeling Interface (OpenMI) for integrated water resources modeling, *Environmental Modelling & Software*, 108, 133-153. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.07.015>

Chang, S. and Chung, I. M. (2014). Analysis of groundwater variations using the relationship between groundwater use and daily minimum temperature in a water curtain cultivation site, *The Journal of Engineering Geology*, 24(2), 217-225. <https://doi.org/10.9720/kseg.2014.2.217>

Chang, T. S., Kim, J. C., Choi, W. G., and Kim, K. O. (2009). Study on the development of open interfaced geospatial information service platform, *Journal of Korea Spatial Information System Society*, 11(1), 17-24. [Korean Literature]

Cannata, M. and Neumann, J. (2017). The Observation Analysis Tool: A free and open source tool for time series analysis for groundwater modelling, *Geoingegneria Ambientale e Mineraria, Anno LIV*, n. 2, 51-56.

Chawanda, C. J., George, C., Thiery, W., Griensven, A. V.,

**Table 2.** Comparison matrix of modeling systems from a platform perspective

	Source	FREEWAT	OMS	OpenMI	CSDMS	HydroShare
Openness	Commercial	GPL2.0	LPGL2.1	LPGL2.0	BSD	BSD
Scalability	medium	medium	high	medium	high	low
Transparency	medium	high	high	high	high	high
Sustainability	high	high	high	high	high	high
Functional (water quantity, quality, ecosystem) linkage	medium	medium	high	medium	high	medium
Spatial (horizontal- vertical) linkage	high	medium	high	high	high	medium
Temporal (multi-scale climate information) linkage	high	medium	high	high	high	high
GIS-based user Interface	medium	medium	medium	high	high	low
Participation models	low	high	high	high	high	high

- Tech, J., Arnold, J., and Srinivasan, R. (2020). User-friendly workflows for catchment modelling: Towards reproducible SWAT+ model studies, *Environmental Modelling and Software*, 134, 104812. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104812>
- Cho, J., Jung, I., Cho, W., Lee, E., Kang, D., and Lee, J. (2018). Suggestion of user-centered climate service framework and development of user interface platform for climate change adaptation, *Journal of Climate Change Research*, 9(1), 1-12. [Korean Literature]
- Cho, J., Mostaghimi, S., and Kang, M. S. (2010). Development and application of a modeling approach for surface water and groundwater interaction, *Agricultural Water Management*, 97(1), 123-130. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2009.08.018>
- Choi, J. Y. (2018). Policy direction for conservation of aquatic ecology and water environment in unifying water management, *Journal of Water Policy and Economy*, 31, 13-27. [Korean Literature]
- Chun, S., Yoon, S., and Jeong, S. (2020). A study on the business model design and economic evaluation of open source software license compliance platform, *Journal of the Korea Society for Simulation*, 29(2), 1-10. <https://doi.org/10.9709/JKSS.2020.29.2.001> [Korean Literature]
- Community surface dynamic modeling system (CSDMS). (2020). *Community surface dynamic modeling system (CSDMS)*, [https://csdms.colorado.edu/wiki/Main\\_Page](https://csdms.colorado.edu/wiki/Main_Page) (accessed sep. 2020)
- Criollo, R., Velasco, V., Nardi, A., Manuel de Vries, L., Riera, C., Scheiber, L., Jurado, A., Brouyère, S., Pujades, E., Rossetto, R., and Vázquez-Suñé, E. (2019). AkvaGIS: An open source tool for water quantity and quality management, *Computers & Geosciences*, 127, 123-132. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2018.10.012>
- David, O., Ascough, J. C., Lloyd, W., Green, T. R., Rojas, K. W., Leavesley, G. H., and Ahuja, L. R. (2013). A software engineering perspective on environmental modeling framework design: The object modeling system, *Environmental Modelling & Software*, 39, 201-213. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.03.006>
- David, Olaf, Carlson, J. R., Leavesley, G. H., Ii, J. C. A., Geter, F. W., Rojas, K. W., and Ahuja, L. R. (2010). *Object modeling system v3.0*, Developer and user handbook.
- Filippis, G., Borsi, I., Foglia, L., Cannata, M., Velasco Mansilla, V., Vasquez-Suñe, E., Matteo Ghetta, M., and Rossetto, R. (2017). Software tools for sustainable water resources management: The GIS-integrated FREEWAT platform, *Rendiconti Online Della Società Geologica Italiana*, 42, 59-61. <https://doi.org/10.3301/ROL.2017.14>
- Deursen van, A. (1997). Domain-specific languages versus object-oriented frameworks: A financial engineering case study, *Smalltalk and Java in Industry and Academia, STJA '97*, Ilmenau Technical University, 35-39.
- Deursen van, A., Klint, P., and Visser, J. (2000). Domain-specific languages: an annotated bibliography, *ACM SIGPLAN Notices*, 35(6), 26-36.
- Elinor, O. (2011). Reflections on some unsettled problems of irrigation, *American Economic Review*, 101(1), 49-63.
- eWater. (2019). *National hydrologically modelling strategy – development and adoption 2012-2018*, Summary report, eWater.
- eWater. (2020). *eWater system*, <https://ewater.org.au/products/ewater-source/>. (accessed Sep. 2020)
- Gan, T., Tarboton, D. G., Dash, P., Gichamo, T. Z., and Horsburgh, J. S. (2020). Integrating hydrologic modeling web services with online data sharing to prepare, store, and execute hydrologic models, *Environmental Modelling & Software*, 130, 104731. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2020.104731>
- Gijsbers, P., Gregersen, J., Westen, S., Dirksen, F., Gavardinas, C., and Blind, M. (2005). *Open-MI document series: Part B – Guidelines for the OpenMI*, IT Frameworks (HarmonIT).
- Gregersen, J. B., Gijsbers, P. J. A., and Westen, S. J. P. (2007). OpenMI: Open modelling interface, *Journal of Hydroinformatics*, 9(3), 175-191. <https://doi.org/10.2166/hydro.2007.023>
- Harpham, Q. K., Hughes, A., and Moore, R. V. (2019). Introductory overview: The OpenMI 2.0 standard for integrating numerical models, *Environmental Modelling & Software*, 122, 104549. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2019.104549>
- Horsburgh, J. S., Morsy, M. M., Castronova, A. M., Goodall, J. L., Gan, T., Yi, H., Stealey, M. J., and Tarboton, D. G. (2016). HydroShare: Sharing diverse environmental data types and models as social objects with application to the hydrology domain, *Journal of the American Water Resources Association*, 52(4), 873-889. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12363>
- Hutton, E. W. H., piper, M. D., and Tucker, G. E. (2020). The basic model interface 2.0: A standard interface for coupling numerical models in the geosciences, *Journal of Open Source Software*, 5(51), 2317. <https://doi.org/10.21105/joss.02317>
- Hutton, E. W. H., Piper, M. D., Peckham, S. D., Overeem, I., Kettner, A. J., and Syvitski, J. P. M. (2014). *Building Sustainable Software – The CSDMS Approach*, ArXiv:1407.4106 [Cs]. <http://arxiv.org/abs/1407.4106>
- HydroShare. (2020). *HydroShare system*, <https://www.hydroshare.org/>, (accessed Sep. 2020)
- Jung, C. G., Park, J. Y., Lee, J. W., Jung, H., and Kim, S. J. (2011). The applicability of SWAT-APEX model for agricultural nonpoint source pollution assessment, *Journal of The Korean Society of Agricultural Engineers*, 53(5), 35-42. <https://doi.org/10.5389/KSAE.2011.53.5.035> [Korean Literature]
- Kang, H. S., Jang, J. H., Ahn, J. H., and Kim, I. J. (2011). Numerical estimations of nakdong river flows through linking of watershed and river flow models, *Journal of Korea Water Resources Association*, 44(7), 577-590. <https://doi.org/10.3741/JKWRA.2011.44.7.577> [Korean Literature]
- Kim, J. T., Chung, I. M., Kim, N. W., and Jeong, G. C. (2011).

- Feasibility study of a groundwater dam in osibcheon, using SWAT-MODFLOW, *The Journal of Engineering Geology*, 21(2), 179 - 186. <https://doi.org/10.9720/kseg.2011.21.2.179>
- Kim, N. W., Chung, I. M., Yoo, S. Y., Lee, J. W., and Yang, S. K. (2009). Integrated surface-groundwater analysis in jeju island, *Journal of Environmental Science International*, 18(9), 1017 - 1026. <https://doi.org/10.5322/JES.2009.18.9.1017>
- Kim, Y. J. and Jeong, E. S. (2015). Socio-hydrology or hydro-sociology: Research on mutual evolution between humans and the water cycle, *Water for future*, 48(7), 34-43.
- Koltsida, E. and Kallioras, A. (2019). Groundwater flow simulation through the application of the FREEWAT modeling platform, *Journal of Hydroinformatics*, 40, 812-833.
- Lagoze, C., H., Sompel, V. D., Johnston, P., Nelson, M., Sanderson, R., and Warner, S. (2008). *Open archives initiative object reuse and exchange: ORE specification - abstract data model*, <http://www.openarchives.org/ore/1.0/datamodel.html> (accessed November 2020).
- Leavesley, G. H., Lichty, R. W., Troutman, B. M., and Saindon, L. G. (1983). *Precipitation runoff modeling system: users manual*, Water Resources Investigations USGS, Denver, Colorado.
- Leavesley, G. H., Markstrom, S. L., and Viger, R. J. (2006). *USGS modular modeling system (MMS) e Precipitation-runoff modeling system (PRMS)*, Singh, V. P. and Frevert, D. K. (Eds.), Watershed Models. CRC Press, Boca Raton, FL, 159-177.
- Lin, Y. H., Ko, T. M., Chuang, T. R., and Lin, K. J. (2006). Open source licenses and the creative commons framework: License selection and comparison, *Journal of information science and engineering*, 22(1), 1-17.
- Lloyd, W., David, O., Ascough, J. C., Rojas, K. W., Carlson, J. R., Leavesley, G. H., Krause, P., Green, T. R., and Ahuja, L. R. (2011). Environmental modeling framework invasiveness: Analysis and implications, *Environmental Modelling & Software*, 26(10), 1240-1250. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2011.03.011>
- Marston, F., Argent, R., Vertessy, R., Cuddy, S., and Rahman, J. (2002). *The status of catchment modelling in australia. crc for catchment hydrology*, Clayton, 39.
- Meyer, B. (2001). NET is coming [microsoft web services platform], *Computer*, 34(8), 92-97. DOI 10.1109/2.940017.
- Moore, R. V. and Tindall, C. I. (2005). An overview of the open modelling interface and environment (the OpenMI), *Environmental Science & Policy*, 8(3), 279-286. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2005.03.009>
- Morsy, M. M., Goodall, J. L., Castronova, A. M., Dash, P., Merwade, V., Sadler, J. M., Rajib, M. A., Horsburgh, J. S., and Tarboton, D. G. (2017). Design of a metadata framework for environmental models with an example hydrologic application in HydroShare, *Environmental Modelling & Software*, 93, 13-28. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2017.02.028>
- Na, E. H., Shin, C. M., Park, L. J., Kim, D. G., and Kim, K. (2014). A Study on the operational forecasting of the nakdong river flow with a combined watershed and waterbody model, *Journal of Korean Society on Water Environment*, 30(1), 16-24. <https://doi.org/10.15681/KSWE.2014.30.1.016> [Korean Literature]
- OGC. (2014). *OGC® Open modelling interface interface standard*, Open Geospatial Consortium, 122. <http://www.openengis.net/doc/IS/openmi/2.0>
- OMS. (2020). *Object modeling System*, <https://alm.engr.colostate.edu/cb/wiki/16961> (accessed Sep. 2020)
- Organization for Economic Cooperation and Development (OECD). (2016). *Recommendation of the Council on Water*, OECD.
- Overeem, I., Berlin, M. M., and Syvitski, J. P. M. (2013). Strategies for integrated modeling: The community surface dynamics modeling system example, *Environmental Modelling & Software*, 39, 314-321. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2012.01.012>
- Peckham, S. D., Hutton, E. W. H., and Norris, B. (2013). A component-based approach to integrated modeling in the geosciences: The design of CSDMS, *Computers & Geosciences*, 53, 3-12. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2012.04.002>
- Rahman, J.M., Perraud, J. M., Seaton S. P., Hotham, H., Murray, N., Leighton, B., Freebairn A., Davis, G., and Bridgart, R. (2005). Evolution of TIME, *MODSIM 2005 International Congress on Modelling and Simulation*, Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand, 4(5), 697-703.
- Rossetto, R., De Filippis, G., Borsi, I., Foglia, L., Cannata, M., Criollo, R., and Vázquez-Suñé, E. (2017). Spatial analysis and simulation tools for groundwater management: The FREEWAT platform. *Acque Sotterranee, Italian Journal of Groundwater*, 6(3). <https://doi.org/10.7343/as-2017-293>
- Rossetto, R., De Filippis, G., Borsi, I., Foglia, L., Cannata, M., Criollo, R., and Vázquez-Suñé, E. (2018). Integrating free and open source tools and distributed modelling codes in GIS environment for data-based groundwater management, *Environmental Modelling & Software*, 107, 210-230. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.06.007>
- Rossetto, R., De Filippis, G., Triana, F., Ghetta, M., Borsi, I., and Schmid, W. (2019). Software tools for management of conjunctive use of surface- and ground-water in the rural environment: Integration of the farm process and the crop growth module in the FREEWAT platform, *Agricultural Water Management*, 223, 105717. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2019.105717>
- Searle, R. and Penton, D. (2012). *Review of The Invisible Modelling Environment (TIME)*, CSIRO.
- Song, D. H., Ryu, J. W., and Jung, E. H. (2015). A study on application of open platform of spatial information for improvement of environment impact assessment supporting system, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 18(1), 105-119. <https://doi.org/10.1016/j.agsci.2015.03.009>

- 11108/kagis.2015.18.1.105 [Korean Literature]
- Syvitski, J., Hutton E. W. H., Mark, D., Piper, M. D., Overeem, I., Kettner, A. J., and Peckham, S. D. (2014). Plug and play component modeling - the CSDMS2.0 approach, *Proceedings of the 7th Intl. Congress on Env. Modelling and Software*, International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs). San Diego, CA.
- Tarboton, D. G., Idaszak, R., Horsburgh, J. S., Heard, J., Ames, D., Goodall, J. L., Band, L., Merwade, V., Couch, A., Arrigo, J., Hooper, R., Valentine, D., and Maidment, D. (2014). HydroShare: Advancing collaboration through hydrologic data and model sharing, *International Congress on Environmental Modelling and Software*, 7, <https://scholarsarchive.byu.edu/iemssconference/2014/Stream-A/7>
- United States Environmental Protection Agency (U. S. EPA). (2019). *BASINS 4.5 (better assessment science integrating point and non-point sources) modeling framework*, National Exposure Research Laboratory, RTP, North Carolina.
- Weon, D. (2018). Service platform design for smart environment disaster management, *The Journal of the Convergence on Culture Technology*, 4(3), 247-252. <https://doi.org/10.17703/JCCT.2018.4.3.247>
- Yeon, S. H., Lee, I. S., and Tcha, T. K. (2014). Interface server model for the effective data link between public data portal and open platform, *Journal of cadastre*, 44(1), 113-125. [Korean Literature]
- Yoo, H. Y., Lee, K. W., Lee, K. J., and Kim, Y. S. (2013). Questionnaire analysis of geo-spatial open source application, *Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies*, 16(4), 106-119. <https://doi.org/10.11108/kagis.2013.16.4.106> [Korean Literature]
- Zolkifli, N. N., Ngah, A., and Deraman, A. (2018). Version control system: A review, *Procedia Computer Science*, 135, 408-415.