

효율적이고 지속 가능한 통합유역관리 모델링



조 재 필
한국농어촌공사 농어촌연구원
책임연구원
jpcho89@gmail.com



김 철 겹
한국건설기술연구원 수자원환경연구본부
수석연구원
cgkim@kict.re.kr

1. 서론

유역 내 수자

원 최적관리를 위해서는 도시화와 같은 토지이용의 변화 및 전 지구적 기후변화가 수자원에 미치는 영향을 신속히 평가하고 이에 따른 합리적인 정책결정을 도출해 내는 것이 필요하다. 현재 미국을 포함한 물 관리 선진국들은 수문, 수질, 생태 등 수자원에 대한 독립적이고 개별적인 관리에서 벗어나 수량-수질, 지표수-지하수, 수문-수질-생태환경 등 수자원 구성 요소들 사이의 통합을 고려하는 수자원 통합관리를 통하여 수량 부족 및 수질 오염 문제 등을 극복해 나가고 있다.

2001년 글로벌 워터 파트너십(Global Water Partnership, GWP)의 기술위원회에서는 통합 수자원 관리(Integrated Water Resources Management, IWRM)를 “중요한 생태계의 지속 가능성을 손상시키지 않고 공평한 방식으로 경제와 사회 복지를 극대화하기 위해서 물, 토지 및 관련 자원의 조정, 개발, 관리를 축

진하는 과정”으로 정의하였다.

이에 국내에서도 최근에 들어 통합유역관리의 필요성을 인식하고 이수 및 치수 중심의 하천관리에서 친수와 생태계 및 지역주민 등을 포함하는 통합유역관리로 전환하고 있으며, 무분별한 수자원의 개발 보다는 기존 유용 가능한 수자원에 대한 최적관리의 개발·적용 및 수질 오염을 사전에 방지하기 위한 최적관리기법의 도입에도 많은 관심을 갖게 되었다.

유역모델링 기법은 컴퓨터 기술의 발전과 더불어 수자원을 포함한 유역 내 구성 요소들의 개별적인 최적관리를 위해서 많이 사용되어 왔다. 미국의 환경부에서는 오염총량 (Total Maximum Daily Load, TMDL) 관리 제도를 통하여 유역 내 오염원을 농도가 아닌 총량 기준으로 관리해 오고 있다. TMDL 평가를 위해서는 모니터링이 적절한 방법 중 하나이지만 소요되는 과다한 시간과 비용으로 인하여 수학적 모형이 사용되어 왔다. 또한 미국 농무부에서도 보조금을 통해 장려해 온 보존방안들 (Conservation Practices)의 실질적인 효용성을 평

가하기 위해서 보전기법 영향성 평가 프로그램 (Conservation Effects Assessment Program, CEAP)을 수행하고 있으며, 이를 위해 수학적 모형들이 사용되고 있다. 국내에서도 도입하여 적용하고 있는 4대강 권역 별 오염총량제 3단계 시행에 있어서도 원단 위법에서 탈피하여 수질의 공간 및 계절적인 변화를 고려할 필요성을 생각할 때 유역모델링을 통한 수질관리는 이러한 통합적 관리를 평가하고 적용하는데 있어서 중추적인 역할을 담당할 것이라 판단된다. 또한, 전 지구적인 기후변화에 따른 지속적인 기온의 상승 및 강우 패턴의 변화가 예측되고 있는 상황에서 국내의 국가기후변화적응센터에서는 한국 상황에 맞는 기후변화적응 통합영향평가모형의 개발을 추진하고 있다. 따라서, 통합모형의 일부로서 기후변화가 물 순환 및 물 수지 변화 뿐만 아니라 수체 및 토양 안에서의 온도, 수질, 토양수분 등에 미치는 영향에 대한 평가를 위한 모델링 방법의 도입 및 개발이 필요할 것으로 예상된다.

따라서, 본 고에서는 통합유역관리 모델링에서 고려되어야 할 중요한 요소들과 해외에서 사용되고 있는 모델링 툴들을 살펴 봄으로서, 국내의 유역 내에서 발생하는 토지이용 변화 및 기후변화를 포함한 다양한 유역환경 변화가 수문·수질·생태에 미치는 종합적인 영향을 평가하여 최적의 유역 환경 관리기법을 도출하는 데 있어서 활용할 수 있는 지속 가능하고 효율적인 통합유역관리 모델링 방안들을 제시하고자 한다.

2. 통합유역관리의 구성 요소

Savenije (2000)은 통합수자원관리의 4개 중요 요소로 수자원 (water resources), 사용자 (water users),

공간적 규모 (spatial scale)과 시간적 규모 (temporal scale)을 제시하였다. 따라서, 통합유역관리 모델링과 관련하여 공간적 통합 (spatial integration), 시간적 통합 (temporal integration), 및 다양한 수자원 요소 간의 기능적 통합 (functional integration)의 관점에서 살펴보고자 한다.

기능적 통합: 기능적 통합의 예로 지표수-지하수 연계를 들 수 있다. 도시화와 같은 토지이용 변화로 야기되는 홍수피해, 건천화, 수질문제, 및 생태계 변화 등을 이해하기 위해서는 지표수와 지하수를 연계하여 종합적이고 시스템적인 접근방식으로 물 순환 기작을 고려하는 것이 필요하다. 이에 대한 예로서는 지표유출 모의를 위해 널리 사용되고 있는 모형인 SWAT 및 HSPF와 대표적인 지하수 모형인 MODFLOW와의 연계 모델링을 들 수 있다 (김남원 등, 2004; Cho *et al.*, 2009; Geurink *et al.*, 2007). 이 밖에도 최근 생태수문 및 생태수리가 사회의 새로운 관심분야로 대두로 대두되고 있다.

공간적 통합: 공간적으로 볼 때 소유역에서 대유역까지 유역의 크기에 따라서 관리자의 관심 대상이 달라질 수 있는데, 농촌유역을 포함한 중·소규모 유역의 통합 모델링에 있어서 고려되어야 할 중요 프로세스는 대유역 규모의 모델링에서 고려되어야 할 중요 프로세스와 다르다. 예를 들어 발생된 오염원이 수체에 도달하는 과정에서 기작을 차단하는 방법은 비점오염 저감기법으로서 중요할 수 있다. 이런 관점에서 비점오염을 고려하기 위해서는 분포형 모형을 소규모 유역에 적용하는 것이 적합할 것이다. 따라서 규모가 비교적 큰 중유역 이

상에서 비점오염관련 모델링을 수행할 시에는 전체 유역을 적합한 소유역 단위로 구분한 후에, 각 소유역에서는 비점오염을 고려할 수 있는 모형을 적용하고, 모형의 출력력을 전체 유역 규모에서 하천 내 오염물질 거동을 모의할 수 있는 모형에 연계시키는 공간적 통합과정이 가능할 수 있다. 이 밖의 공간적 통합의 다른 예로는 4대강 및 새만금에서와 같이 유역 모델링 (watershed model)을 통하여 상류 유역들로부터 수체에 유입되는 수량 및 오염부하량을 정확히 예측하고 이를 입력으로 이용한 수체 모델링 (waterbody model)을 통하여 방조제 및 하천 내 대규모 수공구조물의 건설 등에 따른 주요하천 및 담수호 내에서의 수리·수질 특성의 변화를 평가하는 방법이 있다 (박재충 등, 2010; 이은정 등, 2012; 정지연 등, 2011). 일반적으로 국내에서 사용되고 있는 유역모델과 수체모델을 이용한 공간적통합의 경우는 HSPF 및 SWAT이 사용되어 왔다.

시간적 통합: 앞서 기능적 통합에서 언급한 지표수-지하수 연계 모델링에서 지표수의 흐름은 지하수 흐름에 비교하여 빠르기 때문에 연계 모델링에 있어서 두 모형은 서로 다른 시간간격을 사용할 수 있다. 이와 같이 다양한 목적에 따라 선택된 모형들은 초단위에서 크게는 월단위까지 서로 다른 계산시간을 사용할 수 있다. 모형들 사이에서 동일한 시간간격 (time step)을 기반으로 하며, 일방향 (one-way)으로 데이터 전달이 필요한 경우의 통합은 매우 간단할 수 있다. 그러나 모형들이 서로 다른 시간간격에 따라 실행되거나 고려되는 요소 사이의 상호작용(two-way interaction)이 고려되어야 하는 상황에서는 기능적 통합이 더욱 복잡해 질 수 있다. 예를 들면 지하수위가 얇은 대수층에서 토지이용 변

화에 따른 지하 침투량의 변화는 지하수 흐름에 영향을 미치고 이는 다시 하천의 유량에 영향을 미칠 수 있으며 하천 유량의 변화 또한 지하수 흐름에 직간접적으로 영향을 미칠 수 있다. 이와 같은 경우에 상호작용이 모형의 매 시간간격 안에서 나란히 실행되어야 한다 (Cho et al., 2010).

3. 통합유역관리 모델링 시스템 구분

우선 통합유역관리를 위한 모델링 틀들을 모형 (model)과 프레임워크 (framework)로 나누어 살펴보고자 한다. 모형과 프레임워크의 차이를 살펴보면 모형은 특정 상황에 맞게 개발 되어서 전혀 다른 시·공간적 또는 기능적 통합을 고려하기가 쉽지 않은 반면에, 프레임워크는 개별적인 상황 보다는 일반적인 상황에 맞도록 개발되어 가능한 모든 통합을 위한 방안들에 대한 표준을 제시함으로써 보다 범용적으로 활용될 수 있다는 점에서 차이가 있다. 최근 수자원과 관련하여 사회적인 관심은 수문 및 수질과 같은 수자원에 대한 독립적이고 개별적인 관리에서 다양한 분야 간의 유기적인 연계를 고려한 통합 수자원관리로 옮겨가고 있으며, 그 영역 또한 생태, 사회, 경제 등 다양한 분야로 급속도로 확장되어 가고 있다. 따라서, 지속 가능한 통합유역관리를 고려할 때, 모형보다는 프레임워크에 기반을 둔 모델링 틀들이 사회로부터 요구되는 수요의 변화를 빠르게 고려하는데 많은 장점을 가지고 있다. 세계적으로 통합수자원 관리를 위한 모델링 프레임워크에 관심을 갖고 개발 중에 있으며, 미국의 Object Modeling System (OMS), 유럽연합의 Open Modelling Interface (OpenMI), 호주의 The Invisible Modeling Environment (TIME)등

이 있다.

또한 통합유역모델링은 연계접근방법 (Linked approach)과 통합접근방법 (Integrated approach)으로 구분할 수 있다. 연계접근방법은 기존에 개발된 여러 모형들의 입출력 데이터의 내·외부적인 변환 및 연계를 통해 유역 구성요소 별 통합을 고려하는 반면에, 통합접근방법은 하나의 시스템 안에서 다양한 모듈들이 연결되어 외부에서의 자료변환 없이 유역 요소들 사이의 통합을 고려한다. 통합접근방법은 중복되는 모형들의 개발을 피하고, 각각의 서로 다른 유역특성을 고려한 모듈들을 선택 함으로서 맞춤형 모델링을 가능하게 하며, 모델링 프레임워크를 기반으로 다양한 전문가의 참여를 유도할 수 있는 장점이 있으나, 연계접근방법에 비하여 개발에 오랜 시간이 걸리는 단점이 있다.

4. 국외 통합유역관리 모델링 현황

효율적인 통합수자원 관리를 위한 시스템을 개발하기 위해서는 앞에서 언급한 수문, 수질, 생태, 경제성 분석 틀들 사이의 기능적 통합, 소유역에서 대유역까지 유역의 크기를 고려한 공간적 통합, 틀들 사이에 다른 시간 간격 (time step)을 고려한 시간적 통합 등이 고려되어야 한다. 모형기반 (model-based) 틀들로는 미국 환경청에서 수질관련 통합관리를 위해 개발하여 세계적으로 많이 사용되고 있는 Better Assessment Science Integrating point & Non-point Sources (BASINS)와 미국 지질국과 개척국에서 공동으로 개발하여 수자원관련 통합관리를 위해서 연구목적이 아닌 실제 수자원관리를 위해 오랫동안 사용되어 온 Watershed and River System Management Program (WaRSMP)을

살펴 보고자 하며, 프레임워크기반 (framework-based) 틀들로는 연계접근방법 (linked approach)에 기반을 둔 유럽연합의 OpenMI와 통합접근방법 (integrated approach)에 기반을 둔 미국의 OMS를 살펴 보기로 한다.

가. BASINS

Better Assessment Science Integrating point & Non-point Sources (BASINS)는 지리정보시스템 (GIS), 전국 유역 데이터 및 최신의 환경 평가 및 모델링 도구를 하나의 편리한 패키지에 통합하여 지역 (regional), 주 (state), 및 지방 (local) 기관이 유역 및 수질 관련 연구를 수행할 수 있도록 하기 위해 미국 환경청에서 개발되어 제공되고 있는 다목적 환경 분석 시스템이다. 현재 버전은 4.0으로 이전 3.1버전과 비교할 때 가장 큰 변화는 상용인 ArcView GIS 대신에 비독점적이며 오픈소스에 기반을 둔 MapWindow를 채택했다는 것이다. 최신버전 또한 3.1버전과 마찬가지로 '웹 데이터 추출기'를 통하여 BASINS 웹 사이트 및 다른 소스에서 GIS 데이터와 다양한 데이터베이스의 동적 다운로드를 위한 도구를 제공 한다. BASINS가 지원하는 모델들은 PLOAD, AQUATOX, HSPF, SWAT, SWMM, WASP를 포함한다.

BASINS 시스템은 기능적 통합의 관점으로 볼 때 유역 내에서 수질을 포괄적으로 고려하기에 필요한 PLOAD와 같은 부하량 추정 모형과, 농업유역, 도시유역, 혼합 토지이용 특성을 보이는 각각의 유역에서 수문 및 오염물질의 이동을 모의할 수 있는 SWAT, SWMM, HSPF과 같은 유역모형들과 하천과 호소와 같은 수체

BASINS V3.0 System Overview

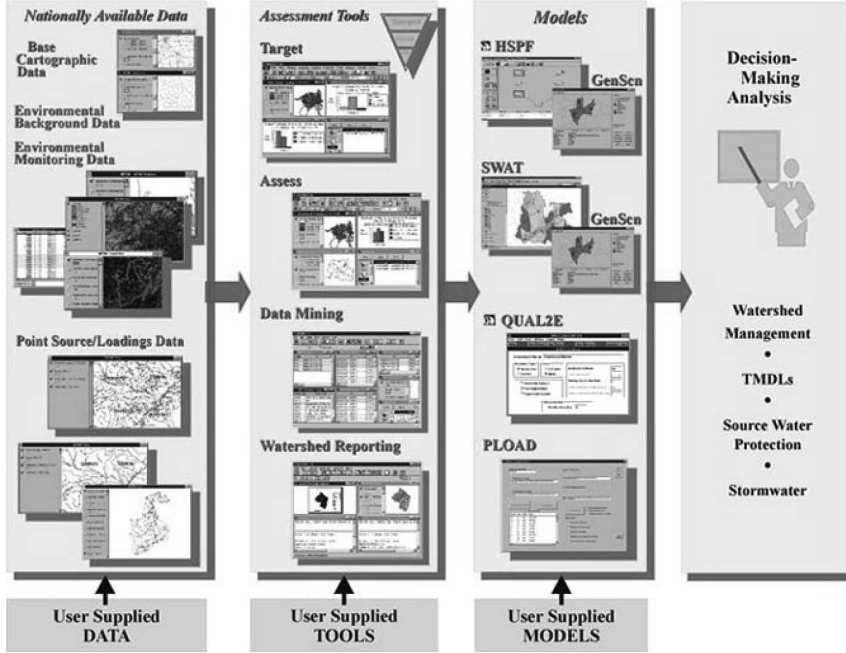


그림 1. BASINS 시스템 구성도 (USEPA, 2001)

내에서의 생물화학적 기작들을 고려할 수 있는 수체모형으로 이루어져 있다. 따라서 PLOAD → HSPF → AQUATOX와 같은 모형들의 연계 적용을 통하여 유역 내에서의 오염총량제 (TMDL) 및 수생태계 고려를 포함한 수질 통합관리를 위한 툴들을 제공하고 있다.

하지만, BASINS의 경우 유역모형과 수체모형 사이의 기능적 통합을 위한 개별 모형들이 포함되어 있지만 각 모형들 사이에서의 시·공간적인 통합뿐만 아니라 쌍방향의 기능적 통합을 고려하도록 지원하지는 못하고 있다. 또한 오염물질이 오염원으로부터 수체에 이르기까지 이동하는 수평적 경로 안에서의 공간적 통합은 고

려되고 있지만 지표수-지하수의 연계와 같은 수직적 통합은 포함되어 있지 않다. 또한 BASINS 인터페이스를 통한 모형들 간의 자동화된 기능적 통합은 제공되지 않고 있다.

나. WaRSMP

Watershed and River Systems Management Program (WaRSMP)은 유역 단위 강우유출의 수문학적 거동을 모의하는 유역모형인 USGS의 Modular Modeling System (MMS)와 하류의 물 사용량을 고려한 저수지 운영 모형, 하천 수리 및 상류 흐름 조건에 따른 구간단위의 생화학적 모의를 할 수 있는 미개척국

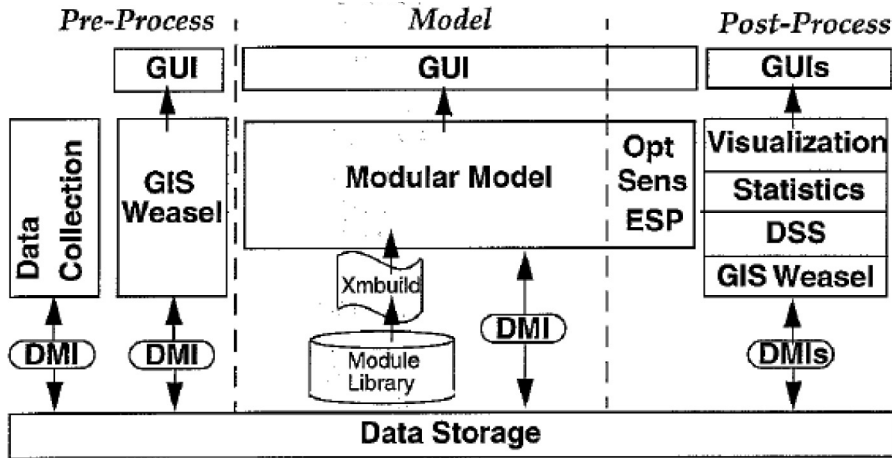


그림 2. Modular Modeling System (MMS) 구성도 (Leavesley et al., 1996)

(Bureau of Reclamation)의 RiverWare를 연계하여 만들어진 의사결정 도구로서 MMS 및 RiverWare와 같은 주요 분석 도구들이 공통의 데이터베이스인 HDB에 연계되어 있다. MMS는 전처리, 모형, 후처리의 세 요소로 구성되어 있는데, 모형 요소의 주요 특징은 물, 에너지, 화학, 및 생물학적 프로세스를 모의하기 위한 다양한 모듈들을 가지고 있는 모듈 라이브러리를 들 수 있다. 사용자는 모형구축 인터페이스인 Xmbuild를 통해서 라이브러리 안에서 적합한 모듈을 선택하고 서로 연결시키는 과정을 통해서 원하는 모형을 제작할 수 있다 <그림2>.

WaRSMP 의사결정 시스템에서(DSS) 유역 모형인 MMS와 하천 모형인 RiverWare 사이의 연계는 수문 시계열 자료, GIS 속성자료, 통계 자료, 수자원 관리와 관련된 자료 등을 저장하는 공통 데이터베이스인 HDB를 통해 이루어진다. 한 모형의 출력 결과가 HDB에 저장되고 다른 모형의 입력자료로 사용되는 과정을 통해

통합된 물 관리를 할 수 있다. 이와 같이 WaRSMP 시스템은 데이터베이스를 중심으로 유역 모형, 하천 모형, 하도구간 모형들의 기능적, 시·공간적 통합 관리를 고려하고 있다. 하지만 WaRSMP 의사결정 시스템에서 고려되고 있는 MMS와 RiverWare 이외의 다른 유역 모형 및 하천 모형을 포함한 포괄적인 통합을 고려하기에는 한계를 지니고 있다.

다. OpenMI

OpenMI는 14기관과 7개 국가의 참여로 HarmonIT 프로젝트로 시작되었고 European Water Framework Directive (EU WFD)의 필요에 의해 OpenMI로 발전하였는데, 기존 유럽연합에 존재하는 다양한 기존 모형들을 시·공간적인 도메인에서 서로를 연결하는데 중점을 두고 있다. OpenMI는 사용자 레벨과 IT 레벨에서 설명될 수 있다. 사용자 레벨에서 OpenMI는 모형들 사이에 서로 다른 시간간격을 고려하여 데이터를 교환하는 표

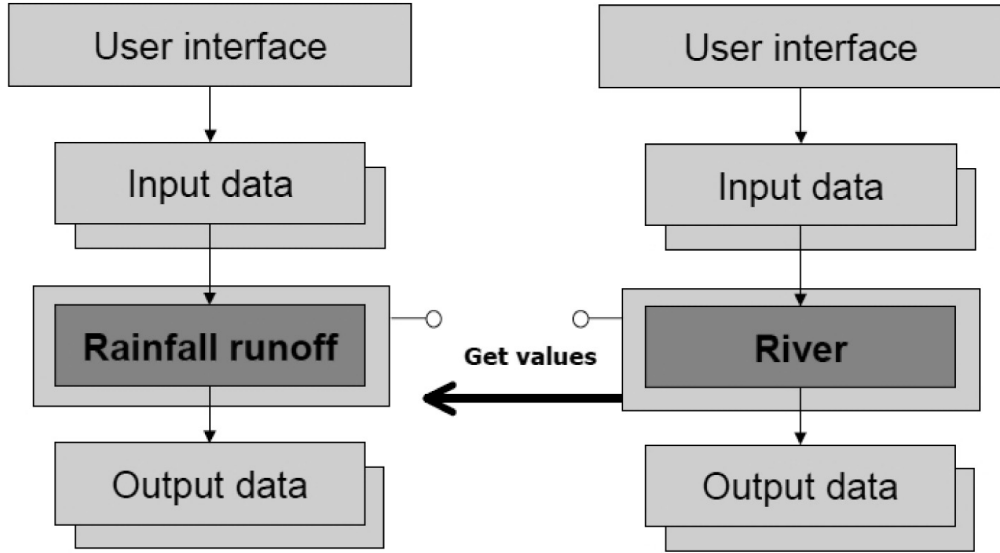


그림 3. OpenMI 표준을 고려한 두 모형간의 연계 적용 (Moore et al., 2005)

준화된 인터페이스를 제공함으로써 프로세스 간 연계 모델링을 위한 편리성을 제공한다. IT 레벨에서 OpenMI 표준은 물 관련 모형들의 계산 엔진(코어)을 위한 소프트웨어 요소 (component) 사이의 인터페이스에 대한 정의를 포함하고 있다. 즉 이 표준을 따르는 모형의 구성요소들은 추가적인 프로그래밍 절차 없이 계산 시간간격 내에서 데이터를 교환할 수 있게 된다. <그림 3>은 OpenMI를 따르는 두 모형의 적용에서 각 모형의 엔진이 OpenMI 인터페이스의 일부가 되었을 때, 전체 구조의 변화 없이 하나의 컴포넌트에서 다른 컴포넌트로부터 값을 불러 오는 개념을 보여 주고 있다. 이와 같이, OpenMI는 모형 사이에서 데이터 교환을 위한 표준화된 인터페이스를 제공함으로써 유럽연합에서 개발되어 사용되고 있는 기존 모형들 사이의 시간적인 통합을 중심으로 공간 및 기능적인 통합을 고려할 수 있도록 발

전되어 왔으며, OpenMI의 규약을 따르는 모형들 사이에 발생할 수 있는 조합들 사이에서의 보다 자유로운 통합을 지원하고 있다.

기능적 통합을 살펴보기 위해서 OpenMI 표준을 따르는 모형들을 살펴 보면 OpenMI 1.4 버전에는 유역 모형(SWAT, MIKE SHE)을 포함하여 지하수 모형(ZOOMQ3D, MIKE SHE), 도시 물순환 모형(InfoWorks CS, SMUSI, OpenMI, MIKE URBAN), 수리모형 (InfoWorks RS, Sobek-RE, Waqua, MIKE 11, RiSH-1D), 저수지 관리 모형 (RMM-NTUA) 등이 포함되어 있다. 또한 1.4 버전에는 포함되어 있지 않지만 구버전에 포함되어 있는 모형들로는 생태 수문 모형 (DemNat), 농업 관련 모형 (Capri, Agricom), 생·물리학적 모형 (Apes), 생물·경제 모

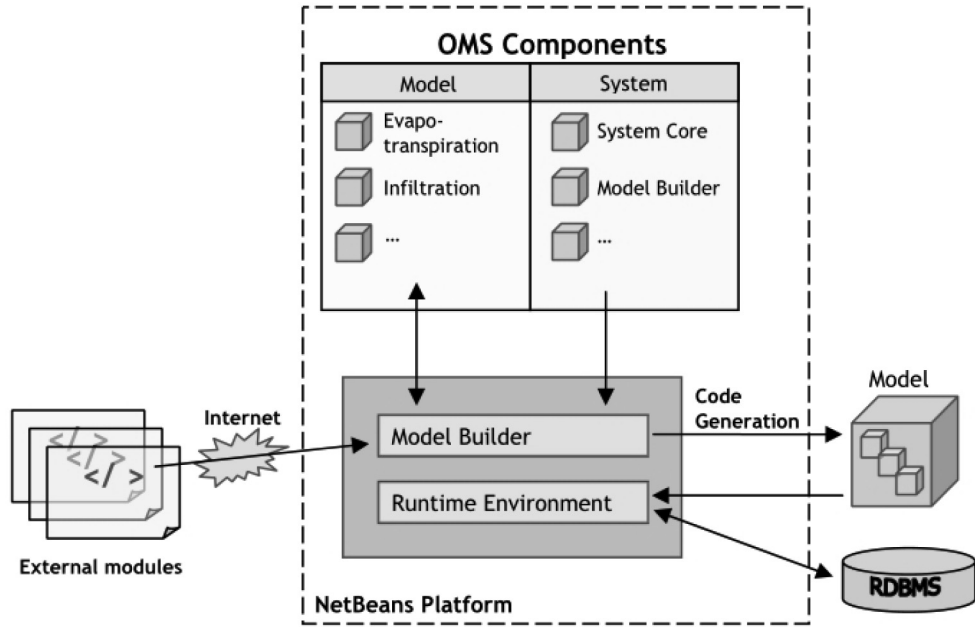


그림 4. Object Modeling System (OMS)의 구성 (Kralisch et al., 2005)

형 (FSSIM) 등이 있다.

라. OMS

Object Modeling System (OMS)은 USGS, USDA 및 Friedrich-Schiller University의 공동 참여로 Java 언어를 기반으로 개발된 환경 모형들을 설계하고, 만들고, 검증하고, 배포하는 것을 목적으로 한 프레임워크이며 개발 도구이다.

〈그림 4〉는 OMS 모델 개발 플랫폼의 아키텍처를 보여 주고 있는데, 플랫폼은 모형 제어 (시간, 공간, 위상, 입력·출력)를 위한 재사용 가능한 시스템 컴포넌트, 수문·수질, 토양침식, 식물생장, 지하수 등 유역 내 구성 요소들을 고려하기 위한 모듈들로 구성된 사이언스 컴

포넌트, 모형 보정, 분석 및 전·후처리 시각화를 위한 컴포넌트 등으로 구성되어 있다. OMS는 Model Builder를 통해 시스템 컴포넌트 (System) 및 사이언스 컴포넌트 내에 재활용이 가능한 모듈들을 조합하여 새로운 모형을 만들어 내고 다시 플랫폼 안에서 구성된 모형을 구동시키는 개념으로 작동한다. 현재까지 수문모형을 중심으로 개발 제시되었으며 현재 다양한 모형들이 OMS에서 만들어 지고 있는 중이다. OMS 컴포넌트 라이브러리 (<http://www.javaforge.com/project/omslib>)에는 OMS를 사용하여 과학적인 모형을 구축하는데 있어서 재사용 가능한 자바 기반의 컴포넌트들이 저장 관리되고 있다.

OMS3은 이상의 컴포넌트들을 이용하여

Thornthwaite Monthly Balance Model, Precipitation Runoff Modeling System (PRMS/OMS), AgroEcoSystem-Watershed Model (AgES-W) 등 여러 환경 모형을 구현할 수 있는데, 이외에도 홈페이지에는 포함되어 있지 않지만 OMS 플랫폼에서 개발되고 있는 모형들로는 토양침식(Flanagan *et al.*, 2005), 작물 성장 (Andales *et al.*, 2005), 자연 자원 (Ascough II *et al.*, 2005), 질소 이동 (Hesser *et al.*, 2010) 등 다양한 분야의 사이언스 컴포넌트 또는 모형들이 개발되고 있다.

5. 국내 통합유역관리 모델링 현황

국내 통합유역관리의 경우를 살펴 보면, 건설기술연구원에서는 세계적으로 널리 적용되고 있는 SWAT 모형의 국내 적용 시 발생하는 한계와 문제점을 해결하기 위해 MODFLOW와 SWAT을 연계한 지표수-지하수 통합모듈의 추가 등 국내 여건에 맞게 수정한 SWAT-K를 개발한 바 있고 (김남원 등, 2010), 수질통합관리센터의 4대강 수질변화를 미리 예측하는 수질예보시스템의 경우는 유역 모형으로는 HSPF를 4대강 본류의 모델링을 위해서 3차원수질 모델인 EFDC를 연계할 수 있는 시스템을 Delft-FEWS 프레임워크 안에서 개발하여 사용하고 있다 (이은정 등, 2012). 새만금 관련 모델링에서도 만경·동진강 유역모델링은 HSPF로 새만금호 안에서의 모델링은 EFDC로 고려하고 있는데, 이는 매뉴얼 방식의 일방향 연계로 수질통합관리센터의 경우와는 차이를 보인다 (정지연 등, 2011). 미국의 BASINS와 같은 개념의 모델링 툴로서는 HyGIS가 있는데, 일반적으로 많이 사용되고 있는 HEC-HMS, HEC-RAS, SWAT,

QUAL2E, TOPMODEL 모형들에 대한 전·후처리 프로세스를 국내에서 개발된 상용 GIS툴인 GEOMania를 기반으로 개발하였다. HyGIS 또한 BASINS와 마찬가지로 포함된 모형들 사이의 연계는 고려되지 않고 있으며, BASINS와의 차이점은 BASINS가 4.0버전에서 기존의 상용 GIS인 ArcView를 버리고 오픈소스 GIS인 MapWindow를 기반으로 시스템을 바꾼 것에 비하여 HyGIS는 상용 GIS를 택하고 있다는 점이다 (김경탁 등, 2011). 미 개척국의 WaRSMP 모델링 시스템과 유사한 국내의 통합유역관리 모델로는 유역 물관리 운영시스템 (Integrated Real-time basin Water Management System, IRWMS)이 있다 (고익환 등, 2008). 국내에서 통합 수자원관리 기술은 2001년에 시작된 “21세기 수자원의 지속적 확보 기술”을 위한 국책연구를 통하여 4대강과 같은 대유역을 대상으로 개발되어 왔다. 이에 실시간 유역 물관리 운영시스템 (Integrated Real-time basin Water Management System, IRWMS)이 개발되어 적용되어왔다. IRWMS는 유역유출 모형인 RRFs(Rainfall-Runoff Forecasting System), 저수지 월 최적운영 모형인 SSDP(Sampling Stochastic Dynamic Program), 일 최적운영 모형인 CoMOM(Coordinated Multi-reservoir Operation Model), 정상상태 수질예측 모형인 Qual2e Plus 모형, 비정상상태 수질예측 모형인 KORIV1 모형으로 구성되어 있다. 개별 해석모형들은 통합 데이터베이스를 통해 입출력 정보를 공유함으로써 연계모의가 가능하다. 이와 같이 국내 통합유역관리 모델링의 경우는 프레임워크 개념을 기반으로 한 접근방식 보다는 특정 상황에 적합한 모형을 연계하는 접근방식 (model-based linked approach)이 대부분인 상황이다.

6. 결론

효율적이고 지속적인 수자원의 관리를 위해서는 유역의 구성 요소들 사이에서의 기능적, 공간적, 시간적 통합이 고려되어야 하며 모델링 툴들이 통합유역관리를 위해 사용될 수 있음을 살펴 보았다. 모형 (model)이 특정 상황에 국한되어 개발되어 진 반면 프레임워크 (framework)는 포괄적인 통합을 위한 표준을 제시함으로써 범용적으로 활용될 수 있다는 점에서, 앞서 살펴본 BANSINS 및 WaRSMP는 모형기반연계시스템 (model-based linked system)에 가깝고 OpenMI 및 OMS는 프레임워크에 가깝다고 볼 수 있다. 수문·수질에서 생태 및 사회·경제적인 측면들을 포함한 통합유역관리로 사회적 요구가 빠르게 변화되어 가고 있는 점을 고려할 때, 모형 보다는 프레임워크 개념을 기반으로 한 접근 방법이 지속적인 통합유역관리를 위해 적합할 것이다. 프레임워크 기반의 모델링 또한 OpenMI와 같

은 연계접근방식 (Linked approach)와 OMS와 같은 통합접근방식 (Integrated approach)로 구분할 수 있는데, 단기적인 통합유역관리의 목적을 달성하기 위해서는 기존에 존재하는 모형들을 최대한 이용할 수 있는 연계방식이 적합하고, 장기적인 측면에서는 유역 구성 요소 별 개발된 모듈(컴포넌트)들을 재활용하여 통합유역관리 목적에 적합한 모형을 구성하여 사용할 수 있는 통합방식이 적합할 것이다.

〈그림 5〉는 통합접근 방식의 프레임워크 기반모델링 개념을 보여 주고 있다. 좌측 그림에서와 같이 BlockCad 안에서 다양한 색깔 및 모양의 블록을 정의하고 이를 끼워 맞추음으로서 사용자가 원하는 형태를 만들어 갈 수 있는 것처럼 유역관리 모델링도 프레임워크 안에서 다양한 모듈들을 정의하고 이를 연계할 수 있는 인터페이스를 제공함으로써 유역의 특정 문제를 해결할 수 있는 맞춤형 모델 구축이 가능할 것이다. 따라서 기

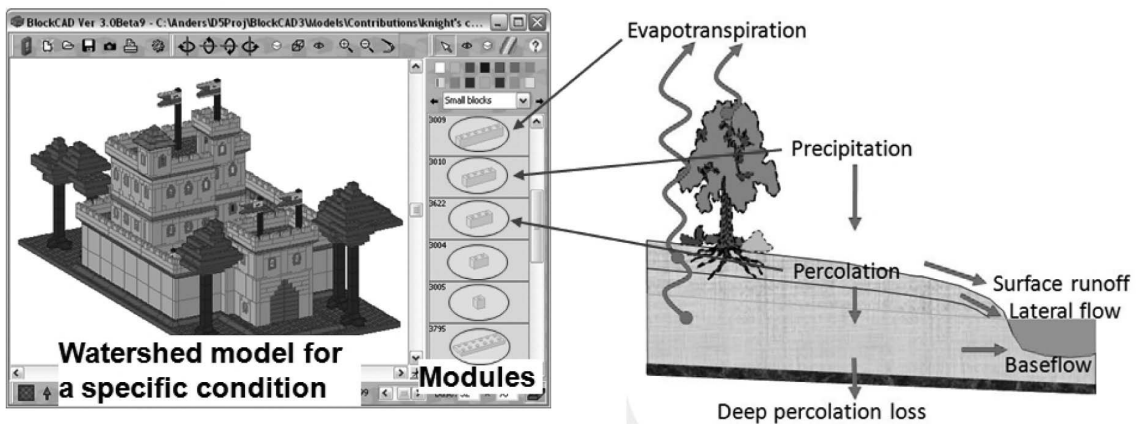


그림 5. 통합접근 방식의 프레임워크 기반 모델링 개념

상·기후와 같은 자연의 변화, 토지이용과 같은 인위적인 변화, 및 사회·경제적인 인식의 변화를 고려하여 수문, 수질, 생태, 경제 등 다양한 분야간의 유기적인 관계를 고려하는 통합유역관리 모델링은 개발되는 모듈들을 재활용할 수 있는 객체지향 모델링 프레임워크 구축을 목표로 추진되는 것이 필요하다고 판단된다. 또한, 이를 통해 보다 다양한 분야의 전문가들이 프레임워크 안에서 재활용이 가능한 모듈들을 추가해 나갈 수 있도록 유도해야 할 것이다. 프레임워크 기반의 모델링 틀을 개발하는데 있어서도 OMS와 같은 대규모 프로젝트를 국내에서 처음부터 다시 시작하기 보다는 오픈소스로 개발되고 있는 OMS를 국내 환경에 맞게 최대한 활용하는 것이 효율적인 유역관리 모델링을 위해 필요할 것이다. 즉, 국내의 특수한 유역환경에 맞는 모듈들만을 개발하여 OMS에 추가하고 기존에 개발된 OMS의 범용적인 모듈들을 가져다 사용하는 것이 합리적인 접근방법이라 생각한다. 유역관리 모델링 틀에 꼭 필요한 GIS 기능 또한 MapWindow나 QGIS와 같은 오픈소스 GIS 툴들을 도입하여 활용하는 것이 효율적일 것이다.

참고문헌

- 김경탁, 최윤석, 2011. HyGIS 상용화 버전 소개. 한국수자원학회지논문집, 44:86-90.
- 김남원, 이정우, 2010. 한국형 유역수문모형 SWAT-K의 개요. 한국수자원학회지, 43:12-9.
- 김남원, 정일문, 원유승, 2004. 완전 연동형 SWAT-MODFLOW 결합모형 (i)모형의 개발. 한국수자원학회논문집, 37:499-507.
- 박재중, 최재훈, 송영일, 송상진, 서동일, 2010. HSPF, EFDC 및 WASP에 의한 영주다목적댐 저수지의 수질예측. 환경영향평가, 19:465-473.
- 이은정, 나은혜, 김경현, 2012. 선제적 수질관리를 위한 수질예보시스템 구축. 전원과자원, 54(1):50-55.
- 정지연, 최강원, 김경목, 신유리, 2011. 새만금 수질예측 모델 연구. 한국농어촌공사.
- Andales, A.A., O. David, and R. Lajpat, 2005. Development of a Forage Growth Component in the Object Modeling System. 2005 ASAE Annual International Meeting, July 17-20, 2005-Tampa, Florida, US.
- Ascough II, J.C., O. David, L.R. Ahuja, and D.C. Flanagan, 2005. Assessing the Potential of the Object Modeling System (OMS) for Erosion Prediction Modeling. 2005 ASAE Annual International Meeting, July 17-20, 2005-Tampa, Florida, US.
- Cho, J., V.A. Barone, and S. Mostaghimi, 2009. Simulation of Land Use Impacts on Groundwater Levels and Streamflow in a Virginia Watershed. Agricultural Water Management, 96:1-11.
- Cho, J., S. Mostaghimi, and M.S. Kang, 2010. Development and Application of a Modeling Approach for Surface Water and Groundwater Interaction. Agricultural Water Management, 97:123-130.
- Flanagan, D.C., J.C. Ascough II, W. Frank Geter, and O. David, 2005. Development of a Hillslope Erosion Module for the Object Modeling System. 2005 ASAE Annual International Meeting, July 17-20, 2005-Tampa, Florida, US.

12. Geurink, J.S., A. Adams, and M.A. Ross, 2007. Water Management Advantages of Comprehensive Representation of Wetlands in an Integrated HSPF–MODFLOW Hydrologic Model. World Environmental and Water Resources Congress, 2007:312.
13. Hesser, F.B., U. Franko, and M. Rode, 2010. Spatially Distributed Lateral Nitrate Transport at the Catchment Scale. Journal of Environmental Quality 39:193–203.
14. Kralisch, P. Krause, and O. David, 2005. Using the Object Modeling System for Hydrological Model Development and Application. Advances In Geosciences, 4:75–81.
15. Leavesley, G., P. Restrepo, S. Markstrom, M. Dixon, and L. Stannard, 1996. The Modular Modeling System (MMS): User's Manual. US Geological Survey Open-File Report 96:151.
16. Moore, R.V., P. Gijbers, D. Fortune, J. Gregersen, and M. Blind, 2005. OpenMI Document Series: Part A – Scope for the OpenMI (Version 1.0). IT Frameworks (HarmoniIT) Contract EVK1–CT–2001–00090. HarmoniIT Consortium, 17pp.
17. Savenije, H.H.G., 2000. Water resources management: concepts and tools. Lecture note. IHE, Delft.
18. USEPA, 2001. Better Assessment Science Integrating point and Nonpoint Sources – BASINS Version 3.0. EPA–823–B–01–001. U.S. Environmental Protection Agency, Office of Water, Washington, DC.

기획: 강문성 mskang@snu.ac.kr