

유역통합 물관리 Toolkit 개발 현황과 활용방안



고 익 환 ▶▶▶

한국수자원공사 수자원연구원 연구위원
ihko@kwater.or.kr



김 남 일 ▶▶▶

(주)웹솔루스 대표이사, 공학박사
utopia@websolus.co.kr

1. 서 론

21세기의 기후변화와 맞물려 더욱 심각해지는 가뭄과 홍수, 물 부족을 둘러싼 이해당사자들 간의 대립, 수질오염으로 인해 발생하는 생태계의 파괴 등으로 인하여 국가와 지역 주민들이 치러야할 사회적 비용을 최소화하는 보다 효율적이고 지속가능한 수자원관리를 구현하려면 유역 차원의 통합수자원관리(Integrated Water Resources Management, IWRM)에 바탕을 둔 수자원 시설물 운영기술 확보가 시급하다. 즉, 유역의 수량과 수질상황을 실시간적으로 분석·예측할 수 있는 모형을 이용, 유역 내 상하류 하천과 저수지군의 효율적 연계운영을 도모하기 위한 의사결정지원시스템(Decision Support System, DSS)의 개발이 필요하다(고익환 등, 2002; 고익환, 2004).

이러한 국가적 물관리 기술수요에 따라 한국수자원공사는 수량과 수질을 동시에 고려한 유역 단위의 통합수자원관리 기술 구현을 목표로 한 프론티어 국책연

구사업의 1단계(2001~2004) 과업을 통하여 유역유출 해석모형을 비롯한 저수지군 모의 및 최적화 모형, 하천 및 저수지 수질예측 모형으로 구성된 데이터베이스 중심의 모듈화 된 해석 시스템인 실시간 유역물관리 운영시스템(Integrated Real-time basin Water Management System, IRWMS)을 개발하였다. 개발된 prototype의 요소기술들은 2단계(2004~2007) 과업기간 동안 집중적인 현장 시험적용 및 검보정 작업과 함께 강우 예측정보 시스템(PRECIP), 실시간 저수지 탁수 감시 및 예측 시스템(RTMMS)이 추가된 '유역통합 물관리 Toolkit'으로 확장 개발되고 있다.

이 글에서는 유역통합 수자원관리를 위한 의사결정 지원시스템의 국내외 개발현황 및 적용사례를 소개한다. 선진국 기술의 대표적인 사례로서 미국 연방정부 물관리기관들의 하천유역 통합 물관리 도구들을 중심으로 기술하였고, 국내 기술은 한국수자원공사 수자원연구원의 주도로 구축 중인 한국형 '통합 물관리 Toolkit'의 기능과 활용방안을 제시하였다.

2. 미 개척국의 WARSMP

WARSMP(Watershed and River Systems Management Program)는 이해당사자들간의 합리적인 물 배분과 실시간적인 유역 수자원 부존량과 이용 가능량의 파악 및 평가를 위해 미 개척국(USBR)과 지질조사국(USGS)에서 공동으로 개발하였다.

이 프로그램은 유역 단위의 물과 환경자원 관리 지원 목적의 분석도구로서 수문학적인 거동을 모의하는 수계모형과 하류의 물 사용량을 고려한 저수지 운영 모형, 하천수리 및 상류 흐름 조건에 따른 구간 단위의

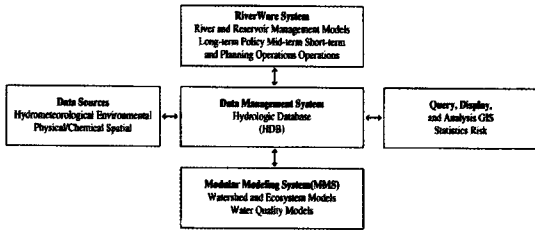


그림 1. 데이터 중심의 하천유역물관리 의사결정지원 시스템

생화학적 모의 모형들이 하나의 시스템으로 결합되어 있다. 또한 개척국이 운영하는 댐군을 중심으로 한 유역단위 수자원 계획 및 관리(물 배분 의사결정)에 활용하고 있으며, 다른 모형과의 연계 및 사용을 위해 필요한 소프트웨어와 모형의 개발을 지원하기도 한다(고익환 등, 2002).

WARSMMP의 핵심은 시스템 안에 결합된 MMS나 RiverWare와 같은 주요 분석도구들이 공통의 데이터베이스인 HDB(Hydrologic DataBase)와 연계되어 있다는 데 있다. HDB는 주로 시계열 수문자료, GIS 속성자료, 통계정보 및 수자원관리에 필요한 자료들을 저장하게 되며 관계형 DB로 설계되었다(그림 1).

개발된 WARSMMP는 San Juan과 콜로라도 하천유역에 적용되었다. San Juan 유역에서는 수질문제, 멸종 동식물 보호, 콜로라도와 뉴 멕시코주간의 물배분 협약관련 문제의 조정해결에 이 프로그램을 사용하였

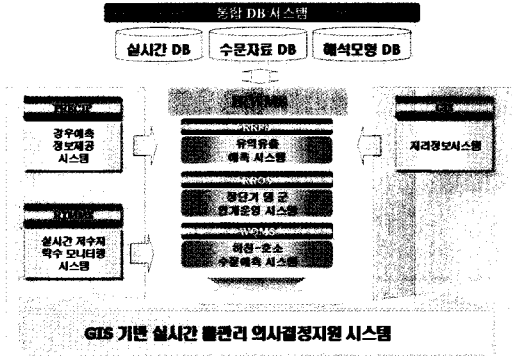


그림 2. GIS 기반 실시간 물관리 의사결정지원시스템의 구성도

고, 콜로라도강 유역의 경우 기존의 CRSS(Colorado River Simulation System)의 운영틀들을 RiverWare의 운영틀 기반 모의운영 모형으로 대체함으로써 장기 수자원계획 수립 및 정책 입안업무와 중기 운영계획 설정에 활용하였다.

3. 우리나라의 유역통합 물관리 Toolkit

유역 물관리 의사결정지원시스템의 구성은 그림 2와 같다. 이 DSS의 핵심적인 해석 시스템인 IRWMS의 기본적인 구조는 그림 3과 같이 중앙의 데이터베이스 시스템을 중심으로 하여 유역유출 모형인

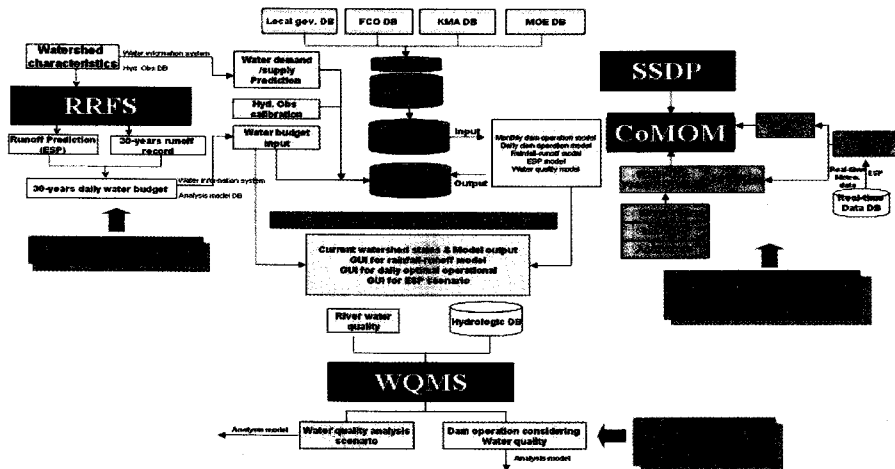


그림 3. IRWMS 구성 및 개념도

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 입력 정보를 공유함으로써 연계모의가 가능하다. 연계모의시 대부분의 해석모형은 장기 하천 유출량 예측 정보를 필요로 하며, 기본적으로 수량과 수질을 고려한 유역 수자원관리를 위한 장단기 저수지 시스템 연계운영 의사결정을 지원할 수 있도록 일단위의 월 예측 유출량을 기반으로 모의된다.

3.1 강우 예측정보시스템

강우 예측정보시스템의 월 강우 예측자료는 수치기상예보(NWP)와 월 기상 전망 결과의 조합을 통해 생성된다. 이 때 수치기상예보(NWP)는 전지구 예보모델(GDAPS)과 지역 예보모델(RDAPS)로 구성된다. 전지구 예보시스템(GDAPS)은 55km 격자 간격의 영역을 대상으로 하여 24시간 간격으로 240시간(6시간 누가강우) 예보를 수행하게 되며, 지역 예보시스템(RDAPS)의 경우 30km 격자간격으로 12시간마다 갱신되는 48시간(3시간 누가강우) 예보를 수행한다.

이를 바탕으로 한 월 강우 예측 시나리오의 구성은 그림 4에 도시하였다. 또한 강수진단모델(QPM)을 도입하여 고해상도 지형자료를 이용한 소규모 지형효과를 고려함으로써 수치예보 자료의 정확성을 향상시키고자 하였다. 강우 예측의 정확도는 유출모형의 정확도에 직접적인 영향을 미치게 되며 해석모형의 특성 및 모의 목적에 따라 달라질 수 있다. 이 시스템의 요소 모듈들인 SSDP와 같은 월 운영 모형 및 RRFS의 장기유출 예측의 경우에는 특정일의 예측 유출량 보다는 월 총 유출량을 정확하게 예측하는 것이 보다 더 중요하다.

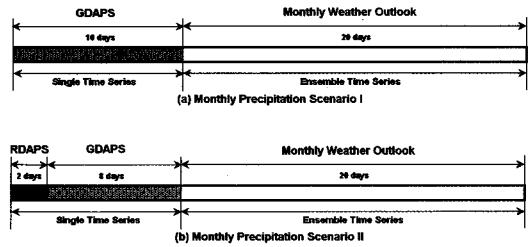


그림 4. 월 강우 예측 시나리오의 구성

3.2 유역유출예측 시스템

유역유출예측시스템인 RRFS(Rainfall-Runoff Forecasting System)는 기상예보를 활용하여 실시간 또는 장단기의 용수수요와 공급을 예측함으로써 한정된 수자원의 효율적 이용을 도모하고자 개발되었다. 그림 5는 이러한 RRFS의 개발 흐름도를 나타낸 것이다. RRFS는 대상 수계의 주요 지점별 월, 일 유출량 등을 지표유출, 지표하 유출, 지하유출 등 수문학적 유출성분으로 분류하고 이를 공간적으로 정보화한다. 또한 유역의 생 공용수, 농업용수 등의 사용 패턴을 반영하기 위해 단기 용수수요 예측 개념을 도입하였으며, 개별 소유역에서 이용가능한 용수량은 공급

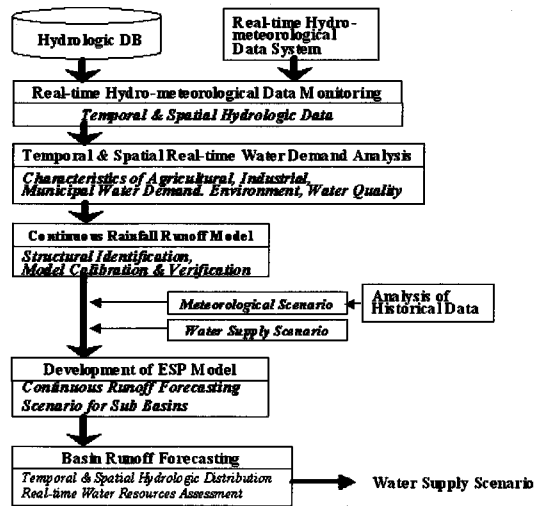


그림 5. RRFS 개발 흐름도

수량과 예측 용수 수요량 사이의 물수지 분석을 바탕으로 산정된다.

이 시스템에는 지속적인 유출해석 수행을 위해 주요 지점에서의 취수량과 하천 유황과 같은 수문정보를 취득, 관리할 수 있는 '실시간 수문자료관리 시스템'을 탑재하였으며, 물공급 계획수립을 위한 의사결정 과정에서 수문기상 정보의 불확실성을 고려하기 위해 확률론적인 하천 유출량 예측 방법인 ESP(Ensemble Streamflow Prediction) 기법을 도입하였다.

유출해석 시스템의 실질적인 개발 및 활용을 위해 강우 자료를 비롯한 하천 수위, 유역의 지형정보, 취수량, 용수 수요량 등 유역의 수문정보를 수집하여 IRWMS 내의 수문정보 데이터베이스에 저장하게 된다. 본 연구에서는 금강수계를 대상으로 ESP 기법을 이용하여 월별 하천 유출량을 예측하였으며 연속 유출 모의를 위해 기반 유출모형으로써 SSARR 모형(USACE, 1987)을 적용하였다. 특히 유출해석의 주요 인자로 작용하며 토양의 습윤 상태를 나타내는 매개변수인 SMI(Soil Moisture Index)의 불확실성을 해소하고자 NOAA 위성자료를 이용한 기후학적 물수지 분석 기법을 도입함으로써 실시간으로 유역의 습윤상

황을 모니터링하고 건습 상태의 변화를 추정하여 장래의 유출상황 및 유황변동을 예상할 수 있는 기반을 마련하였다.

3.3 저수지군 모의 및 최적화 시스템

저수지군 모의 및 최적화 시스템의 개발은 저수지군의 장단기 최적 운영방안을 실시간 통합 물관리 의사결정지원시스템인 IRWMS에 제공하기 위한 것으로서 수계 물수지 및 하천수질 유지유량을 고려한 저수지군 모의운영 모형과 최적연계운영 모형을 구축하는데 그 목적이 있다. 그림 6과 같이 저수지군 운영 모형들은 수계 물수지 및 발전량, 용수 수요량 등을 고려한 장기(월간) 및 단기(일간) 저수지군 운영물을 제공하게 된다.

CoMOM은 수계 내 수문 및 운영 환경을 유연하게 반영할 수 있는 최소비용 네트워크 모형(Network Flow Optimization)을 기반으로 한 혼합정수계획(Mixed Integer Programming, MIP) 모형으로서 상위 모형인 SSDP 모형이 제시하는 월말 목표 저수위를 비롯한 하도추적, 발전량 등의 여러 가지 목표

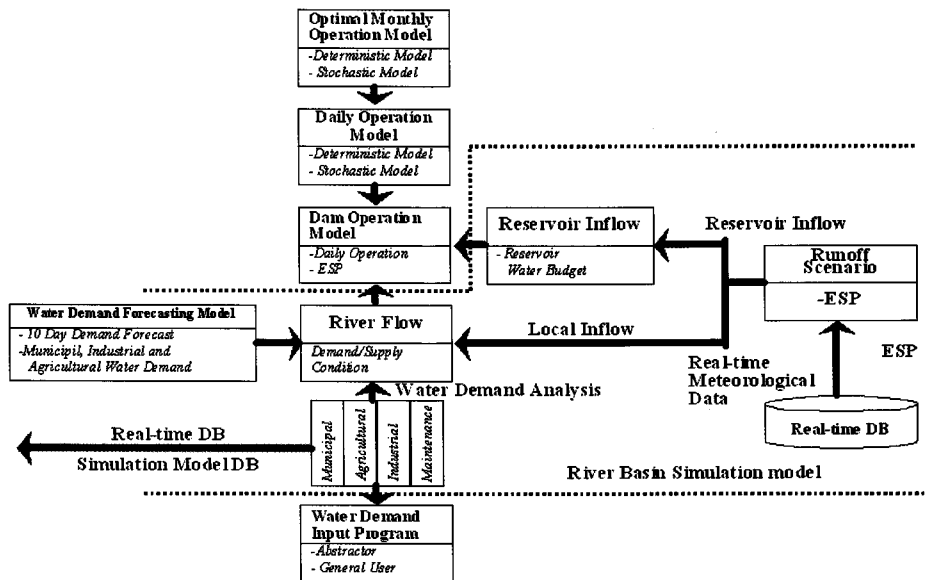


그림 6. 저수지군 운영 모델의 개발 흐름도

(Goal)를 고려하여 일별 저수지 운영 계획을 최적화한다. 즉, SSDP 모형에서 산정된 월말 목표 저수위를 만족하는 최적의 일별 방류량을 결정하게 된다. 이 모형은 보수적인 댐 운영방침을 기초로 하고 있으며, 이는 불필요한 방류를 최대한 억제하여 유역 내 가용한 수자원을 최대한 확보한 상태에서 댐 간의 연계운전을 수행함으로써 유역 내 댐군 연계운영에 의한 실질적인 수자원 보존이 가능해지게 된다. 또한 이 모형에서는 댐 운영자의 의사결정 지원을 위해 저수량 최대화 vs. 발전량 최대화의 Trade-Off 분석을 통한 결과를 제시함으로써 댐 운영자의 경험과 직관에 의한 선택이 가능하도록 파레토 최적해를 제시하고자 하였다.

이러한 월 최적 운영 모형인 SSDP 모형과 일 최적 연계운영 모형인 CoMOM 모형을 네트워크 시뮬레이션 모형인 KModSim 모형과 연동, 실시간 모의 운영을 수행한 결과 과거의 전통적인 댐 운영방식에 비해 용수 공급량과 발전량의 편익이 증가함을 확인할 수 있었다.

3.4 물관리 의사결정 지원을 위한 수질예측 시스템

우리나라의 하천은 갈수기에 지류의 자연유량 감소로 인하여 해마다 주기적으로 하천의 수질이 악화되는 현상이 반복되고 있으며, 환경부의 오염총량관리제가 도입되더라도 기존 유량의 경우 10년 평균 저수량으로 설정되어 있어 갈수기와 가뭄시에는 하천 구간별로 설정된 목표수질 확보가 어려운 것이 현실이다. 따라

서 유역의 한정된 수자원을 효과적으로 이용하기 위해서 하천의 수량 및 수질상황을 고려한 통합 물관리 운영 시스템이 필요하다. 개발된 수질예측 시스템은 수질을 고려한 저수지 운영을 지원할 수 있도록 설계되었으며, 댐 하류의 수질을 평가하기 위해 정상(steady) 및 비정상(unsteady) 상태의 수질해석 모형이 적용되었다. 하천 수질예측모형에 필요한 유출량 자료와 댐 방류량 자료는 유역유출 모형 및 저수지 운영모형과 연계하여 통합 데이터베이스 시스템의 해석모형 데이터베이스에서 취득하여 입력 자료로 구성하게 된다.

정상상태 수질예측모형인 Qual2E-Plus는 미국 EPA의 QUAL2E 모형을 기반으로 하여 개발되었으며, 댐하류 하천 수질을 고려한 월별 또는 장기적인 저수지 운영계획 수립이나 하천유지유량 결정에 활용된다. 하천의 수리와 수질해석이 통합적으로 이루어질 수 있도록 구축한 비정상상태 모형인 KoRiv1-WIN의 경우 하수처리장의 수질오염 사고 또는 갈수기 수질악화 시 상류 댐의 방류 규모 의사결정을 위해 활용된다. KORIV1-WIN 모형은 댐 하류 수질에 대한 저수지 방류량의 영향을 분석하기 위해 미 육군공병단(USACE)의 CE-QUAL-RIV1 모형을 바탕으로 윈도우즈 기반으로 개발하였다.

3.5 실시간 탁수 감시 및 예측 시스템

RTMMS(Real-time Turbidity Monitoring &

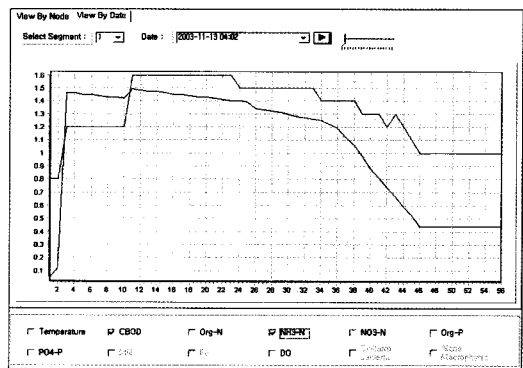
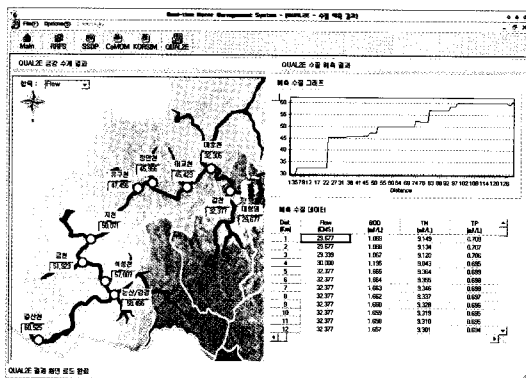


그림 7. 정상상태(좌)와 비정상상태(우) 수질예측시스템 GUI 예시

Modeling System)는 현장 계측기로부터 수집되는 실시간 탁수 자료를 이용하여 데이터를 모니터링하고 CE-QUAL-W2모형을 이용하여 모델링을 수행한 후 결과를 그래프로 도출하는 실시간 탁수 감시 및 예측 시스템이다. RTMMS는 실시간 계측, 데이터베이스, 분석모델, 사용자인터페이스가 통합된 시스템으로 개발되었으며 구성요소는 그림 8과 같다.

RTMMS는 저수지 유입지점의 실시간 계측 자료와 저수지내 월간 및 주간 정기 측정 자료를 데이터베이스에 저장·조회하는 실시간 감시(Realtime Monitoring), 탁수예측모델의 입력자료 생성(Input Data Generation), 탁수예측 모델의 수행 (W2 Run), 모델 수행결과 출력 및 분석을 위한 후처리(Post-Process) 기능을 제공한다(그림 9). 그리고 다

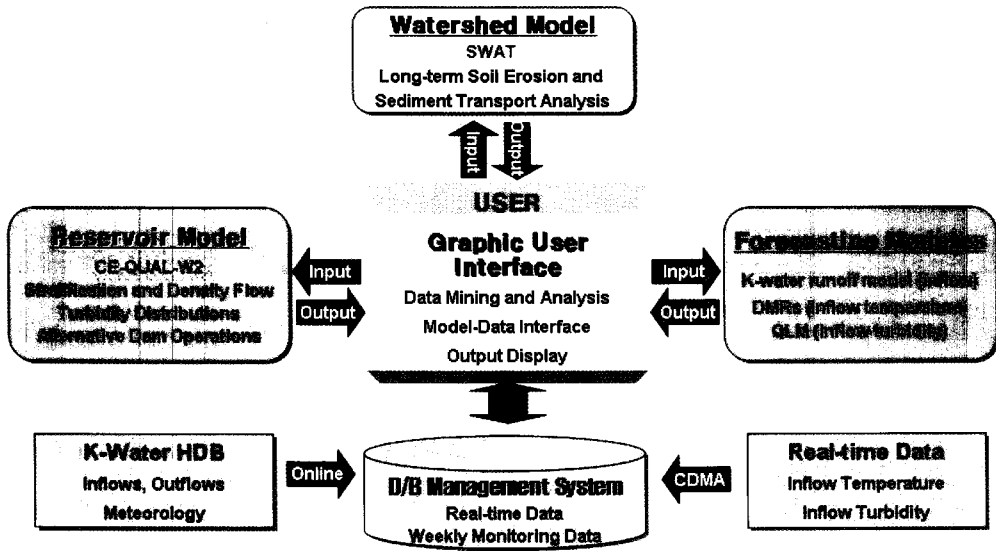


그림 8. RTMMS의 시스템 구성

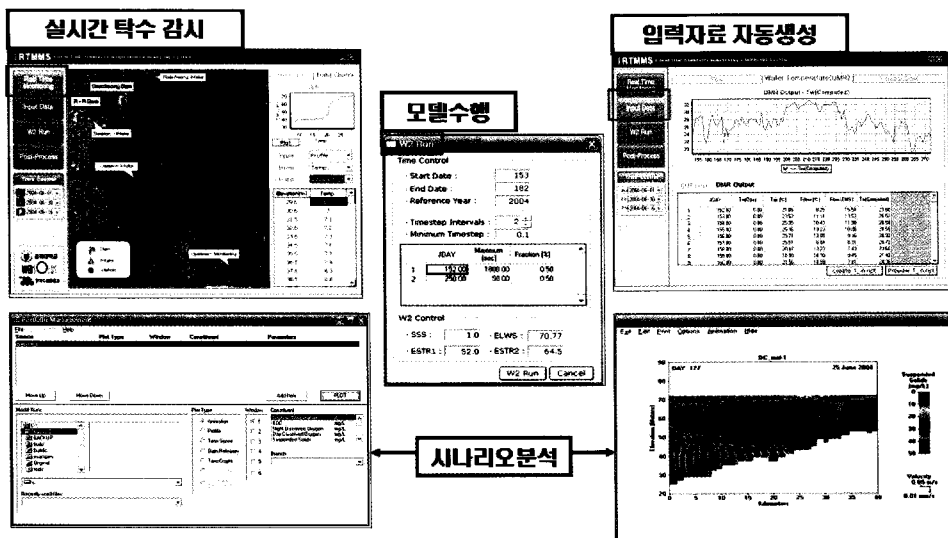


그림 9. RTMMS의 기능 및 GUI 화면

양한 저수지 운영조건에 따른 시나리오별 모의결과를 포트폴리오로 저장하여 탁수의 거동특성과 지속기간 등을 비교분석 할 수 있도록 함으로써 저수지운영자의 의사결정지원이 가능하도록 설계 하였다. 또한 유역의 강우유출 해석과 탁수 유발물질 이송을 해석할 수 있는 유역해석모델(SWAT)을 구축하여 오프라인으로 연계함으로써 유역의 탁수저감대책 효과를 분석하기 위한 목적으로도 활용할 수 있도록 하였다.

지금까지 RTMMS는 대청호를 대상으로 구축하여 보정·검증을 하였고, 2006~2007년 홍수기에는 탁수의 저수지내 거동과 방류수 탁도의 실시간 예측을 위해 시험적용 되었으며, 선택취수방법과 부상웨어(Skimmer weir)방법의 탁수조절효과를 평가하는 데 사용되었다.

3.6 통합 데이터베이스 시스템

통합 데이터베이스 시스템은 유역의 물 관련 정보를 기상, 지표수, 지하수, 대체 수자원 측면에서 수량과 수질을 고려하여 시공간적으로 제공할 수 있는 DB 시스템으로서 유역의 물 관리 의사결정권자에게 다양한 수문 및 댐 운영 정보를 제공하게 된다(그림 3). 중앙부의 데이터베이스 구조도와 같이 이 시스템은 실시간 데이터베이스를 비롯한 수문자료 데이터베이스, 해석모형 데이터베이스로 구성되며 데이터베이스 내의 모든 자료는 기본적으로 일별로 저장되도록 설계되었다.

실시간 데이터베이스는 한국수자원공사를 비롯한 유관기관의 데이터베이스로부터 수집한 강우, 수위, 댐 방류량 등의 실시간 원시 자료를 저장, 관리할 수 있는 데이터베이스를 의미하며, 수문자료 데이터베이스에 포함되는 자료는 모듈화된 개별 분석 시스템의 모의를 위해 실시간 원시 자료를 보정 및 가공하여 생산한 데이터로서 유역 평균 강우 및 주요 지점의 유량, 생공농용수량, 취수량 등이 이에 해당한다. 해석모형 데이터베이스는 IRWMS의 분석 모듈인 유역유출 모형을 비롯한 댐운영 모형, 수질예측 모형의 모의수행

결과를 저장하기 위한 데이터베이스 시스템으로써 개별 해석모형 간의 연계 운영 시 데이터가 원활히 공유되도록 설계·구축되었다.

통합 데이터베이스 시스템의 해석모형 데이터베이스를 통해 IRWMS 해석모형들은 입출력 자료를 공유함으로써 상호 연계된 모의운영이 가능하다. RRFs 모의수행 결과인 소유역별, 지점별 유출량은 저수지 운영 모형인 SSDP와 CoMOM, 수질예측 모형인 QUAL2E의 입력 자료로 활용되고, SSDP 모형에 의해 계산된 월 최적 목표 수위는 일 최적 저수지 운영을 위한 CoMOM 모형의 입력 자료로 이용된다.

4. 결 론

국토의 한정된 수자원을 가장 효율적으로 지속가능하게 공급, 이용 및 보존하기 위한 수단으로써 통합수자원관리의 필요성이 지난 20여년 동안 전 세계적으로 확산됨에 따라 이제는 이를 지원하는 관련 기술개발과 적용능력이 곧 그 나라의 국가경쟁력을 가늠하는 척도가 되었다. 이 글에서는 미국의 선진 물관리 의사결정지원시스템의 개발 현황과 함께 그동안 한국수자원공사가 금강유역을 대상으로 한 댐과 하천, 수량과 수질을 고려한 유역통합 물관리시스템 구축 현황을 소개하였다.

유역 내 기존 댐저수지들을 하천과 연계하여 가장 효율적으로 운영하기 위한 유역통합 물관리시스템은 유역의 장·단기 용수수급상황을 실시간적으로 파악하고, 수계 내 주요 제어지점들과 소유역 구간별 하천 유출량을 예측하여 시기별·목적별로 필요한 용수수요를 수질상태를 반영해서 최대한 충족하도록 물을 공급하는 의사결정지원시스템을 의미한다.

우리보다 10년 이상 앞서서 막대한 연구개발 투자로 이미 통합수자원관리 기술의 안정화, 실용화 단계에 접어든 선진국들에 비하면 우리나라의 관련 기술수준은 아직까지 개발의 중간단계에 불과하지만, 향후 수년간 산학연 공동의 집중적인 노력으로 대상유역인

금강 유역에의 시스템 적용을 실용화시켜 가면서 인접한 한강과 낙동강으로 기술확산을 해 간다면 머지 않아 우리의 기술수준을 선진국 대비 80% 이상을 높여 나갈 수 있을 것으로 기대 한다.

이러한 유역통합 물관리 Toolkit은 유역 단위의 수량과 수질, 환경생태에 대한 기술적, 제도적 통합 및 조정과 함께 유역 내 수자원과 토지 등 여타 자원의 통합관리, 지표수와 지하수의 통합관리 지원을 가능하게 하며, 물 이용자의 이해관계를 합리적으로 반영함과 동시에 지속적인 수자원관리를 구현케 하는 기술적 대안과 절차를 제공하게 될 것이다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술 개발사업단(과제번호:1-6-3)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 고익환, 정세웅 (2002). 통합수자원관리 기반기술 구축방안(I)-선진국의 하천유역 통합물관리 기술개발동향. 한국수자원학회지, 제35권, 제6호, pp. 61-70.
- 고익환 (2004). “호주 유역통합물관리 기술개발 동향과 전망-2004 호주 Catchment Modelling School”, 한국수자원학회지, 제37권, 제2호, pp. 98-103.
- 고익환 (2004). “유역 통합 수자원관리 기술개발”, 한국수자원학회지, 제37권, 제3호, pp. 10-15. ☺