



학술기사

통합수자원관리 기반기술 구축방안(I)

선진국의 하천유역 통합물관리 기술개발동향

고 익 환 (한국수자원공사 수자원연구소 부장)

정 세 응 (한국수자원공사 수자원연구소 과장)

1. 서론

한정된 수자원을 여러 가지 목적과 제약조건을 충족시키면서 가장 효율적으로 이용·보존하기 위한 수단으로서 유역단위 통합수자원관리의 필요성이 전 세계적으로 급속히 확산되고 있다. 그러나 통합수자원 관리(IWRM: integrated water resources management)는 해당 국가 또는 유역이 처해 있는 수량·수질환경 문제의 특성, 관련 제도의 안정성, 공공부문과 민간부문의 상대적 우위와 특성, 문화적 배경 등 다양한 요소에 따라 그 목적과 접근방법을 달리 할 수도 있다(Global Water Partnership, 2000). 미국의 TVA에서는 유역의 홍수관리, 내륙주운, 전력생산 등을 위해 수자원과 토지이용 등을 포함한 유역의 자원통합관리를 수행하고 있으며, 미국 환경청(US EPA)에서는 수질 및 하천생태계 차원의 수계관리를 유역통합관리라고 부르기도 한다.

이러한 수자원의 통합관리를 보다 더 효율적으로 구현하려면 이를 뒷받침할 수 있는 기반기술이 필수적으로 구축되어야 한다. 즉, 물관리 기능별로 각 기관에서 분산·관리하고 있는 물관련 정보를 효율적으로 연계, 공유할 수 있는 통합 물정보 관리체계를 구축하고, 유역의 수량과 수질 상황을 실시간적으로 분석·예측할 수 있는 도구(모형)를 이용하여 유역내 상하류 하천과 저수지군의 효율적 연계운영

을 도모하기 위한 의사결정지원시스템(DSS: decision support system)의 개발이 필요하다.

이 글에서는 환경적인 지속가능성과 물이용의 효율성을 고려한 하천유역 수자원관리의 새로운 개념을 정립해 보고, 유역단위 통합물관리를 위한 모형개발과 의사결정지원시스템 구축을 중심으로 한 미국과 유럽의 물관련 기관들의 기술개발동향과 실제 적용사례를 살펴봄으로써 향후 우리나라 수자원 운영체계 및 물 이용 환경에 부합하는 유역통합물관리 기반기술의 개발방향을 설정하고 시스템 구축방안을 제시하기 위한 기본정보로 활용코자 한다.

2. 지속가능성을 고려한 수자원관리

1992년 6월 브라질에서 개최한 '환경과 개발에 관한 유엔회의(UNCED: United Nations Conference on Environment and Development)'에서 "환경과 개발에 관한 리우선언" 등을 채택하면서 '지속가능한 개발' 개념을 전세계적으로 추진하기로 결정됨에 따라 '지속가능성'은 물관리의 국제적인 기본 이념으로 반영되기 시작하였다. 이 개념은 발전되고 다듬어졌으며 환경의 수용능력(carrying capacity), 공평성(equity)과 배분의 효율성(allocative efficiency)이라는 세 가지 요소를 사용하여 "환경의 수용능력과 그 한계를 인정하고 세대간, 세대내 그리고 생명체간의 공평하게 그 능력을 나누어 사용하고 주어진 양적 한계

속에서 배분적 효율의 증진을 통해 인간의 복리후생을 증진시키는 것"으로 정의되게 되었다 (박희경, 1998).

이렇듯 하천과 저수지의 환경생태보존의 필요성이 높아짐에 따라 신규 수자원 개발사업 추진의 의사결정과정에서 지금까지 고려해 오던 기술적 타당성, 경제적 효율성에 추가하여 환경적인 지속가능성이 큰 비중을 차지하게 되었으며, "물 이용자들에게 필요한 시기와 장소에 필요한 수량의 공급을 보장"하는 종래의 수량위주의 공급지향적 개념의 수자원관리는 "수자원을 계획, 개발, 보존 및 관리에 필요한 일련의 기술적, 경제적, 법적, 제도적, 운영관리의 총체적 행위" (Savenije, 1996)를 뜻하는 수량과 수질을 동시에 고려하는 수요-공급 공동 지향적인 새로운 개념으로 전환하게 되었다.

그러나 이러한 '지속가능성'이란 개념은 여전히 상당히 추상적이어서 개발계획 수립 등 수자원관리에 실제 적용을 위해선 보다 구체적인 원칙이나 지표가 제시되어야 한다.

3. 하천유역 통합수자원관리의 개념

1992년 리우 지구정상회의에서 채택된 Agenda 21을 통하여 지구상의 절대 부족한 담수자원의 지속가능한 확보와 환경 오염 및 훼손에 대처하기 위한 범국가적인 방안으로 지표수와 지하수, 수량과 수질, 물이용의 다양한 용도를 동시에 고려한 '통합수자원 계획 및 관리' (18장 3절), 토지와 물자원을 유역 혹은 소유역 차원에서 통합관리하는 '통합수자원관리' (18장 8절)의 필요성이 강력하게 제기 되었다.

또한 유럽연합(EU: European Union)의 집행위원회인 European Commission은 전술한 '지속가능한 개발' 개념과 '통합수자원관리'의 기본 개념을 바탕으로 유럽대륙의 수자원을 '공평하고, 효율적이고, 지속가능하게 통합관리' 하기 위한 전략인 '수자원에 관한 EC의 정책지침'을 제시하였다 (EC, 1998).

결국 현대의 '통합수자원관리'는 이러한 새로운 개념의 수자원관리를 구현하기 위하여 지표수와 지

하수, 수량과 수질을 고려한 자연과 인공의 수자원 시스템을 포함하며, 농업, 용수공급, 수력발전, 내륙 주운, 어업, 위락, 자연보존 등 국가경제의 다양한 분야의 물이용자들(이해 당사자들)의 이해관계를 반영하게 되며, 사회적, 법적, 제도적, 재정적, 환경적 국가 물관리 목적과 제약조건을 형성하여, 상·하류의 상관성을 고려한 유역단위 분석, 유역간 물이동 등 물자원과 수요의 공간적 변화를 동일한 큰 틀 안에서 포괄적, 종합적으로 다루게 된다 (고익환 등, 2002).

따라서 기존의 수자원관리와는 달리 새로운 통합수자원관리는 그림 1과 같이 용수공급이나 수력발전 등 단일목적의 수량관리 중심의 개별적인 저수지위주의 운영을 탈피하여 하천의 수량, 수질, 환경생태를 동시에 고려한 유역단위의 통합운영을 추구한다. 또한 종래의 지표수 위주의 수자원관리의 틀에서 벗어나 유역 내 다양한 수자원, 즉 지표수, 지하수, 대체/보조 수자원의 통합 연계 관리·운영을 포함으로써 비구조적인 수자원의 지속적인 확보에 주력한다. 이러한 새로운 패러다임의 유역통합물관리를 제대로 정착시키려면 관련 핵심 기반기술의 적극적인 개발 및 충분한 검증, 보안을 통한 실용화 노력과 함께 지역주민, 지자체 등 유관기관, NGO들의 자발적인 참여를 통한 유기적인 협조체제가 필수적이며, 유역 내 필요한 수자원 환경관련 자료와 정보가 공유되고 유통되어야 한다. 이러한 운영

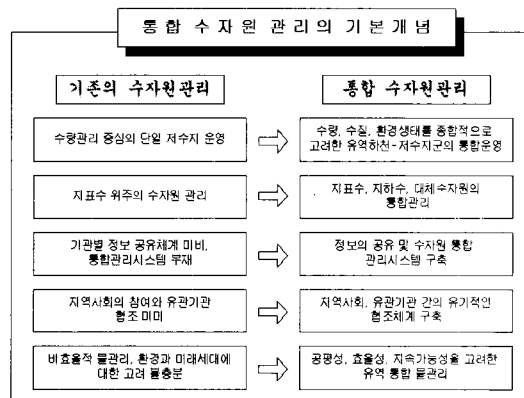


그림 1. 통합 수자원관리의 기본개념

환경을 기반으로 한 통합수자원관리는 특히 물이용 효율의 극대화와 함께 공평하고 지속가능한 수자원의 이용과 관리를 지향해 나감으로써 그동안 수자원관리자들이 소홀히 다루었던 미래세대와 환경에 대해서도 더 많은 배려에 비중을 두게 된다.

4. 선진국의 기술개발 동향

통합수자원관리 분야의 미국과 유럽의 기술은 기술발전주기(technology life cycle)중 기술의 개발단계를 넘어서 이미 안정화 단계에 접어들고 있다. 미국의 대표적인 물관련 연방정부 기관들인 내무성 산하 개척국(USBR: US Bureau of Reclamation)과 지질조사국(USGS: US Geological Survey) 및 테네시 유역관리청(TVA: Tennessee Valley Authority), 환경청(US EPA: US Environmental Protection Agency)들은 수량과 수질 관련 모형을 포함한 유역물관리 시스템의 공동개발 및 공유 등을 통한 통합수자원관리 기술 확보 노력과 아울러 유역 내 수량 및 수질 관련 시·공간적 정보를 국가적 차원에서 생산, 수집, 평가, 보급하고 있다.

유럽의 경우 1984년부터 유럽연합의 회원국들을 중심으로 범 EU차원의 핵심연구개발 사업인 EU Framework Program을 수행해 오고 있으며, 지난 2000년 10월에는 유럽전역의 수자원관리를 일괄해서 획기적으로 개선해 나가기 위한 물관리구조개편 지침(WFD: Water Framework Directive)을 설정하고 2015년을 최종 목표년도로 하여 추진 중에 있다. 이 EU WFD는 물관리에 관한 한 유럽대륙을 하나의 통합된 관리영역으로 간주하고 긴 안목으로 물의 이용과 지속가능한 개발, 생태보존을 상호 연계해서 종합적으로 관리해 가려는 매우 의욕적인 구상이다.

4.1 미 개척국/지질조사국

개척국은 미국 최대의 연방정부 수자원관리기관으로 그동안 Hoover댐, Grand Coulee댐, Grand Canyon댐 등 다수의 댐을 건설해 왔다. 2002년 현

재 미국 중서부지역의 3,100만명 수해지역에의 생공용수 공급, 40,468km²의 농지에 관개용수 공급, 년평균 400억 kWh의 수력에너지를 생산하여 600만 가구에 전력을 공급하고 있으며, 이 지역의 홍수 조절, 가뭄관리 등에 많은 기여를 해 왔다. 최근에는 새로운 수자원의 개발보다 기존 댐저수지 시설물의 운영 효율향상과 함께 하천수계 환경보존 및 회복, 용수 재이용 노력을 동반하는 수자원관리 중심체제로 전환되고 있다.

개척국이 관할하는 서부지역의 대다수 유역들은 공통적으로 인디언 수권, 기득 수리권, 물이용자들의 과도한 선점사용, 저수지 건설 및 관개용수 수요 증가, 야생동물, 어족 보호, 여가위락용수 수요 증가, 하천과 지하수 수질오염 등 복잡다단한 물문제를 안고 있다. 현재로서는 늘어나는 용수수요를 지하수에서 충당하고 있으나, 물사용을 둘러싼 다양한 이해당사자들(stakeholders)간의 경쟁과 대립이 더욱 심화됨에 따라 물관리기관이 이를 합리적으로 고려한 물 배분을 하기 위하여 실시간적인 유역 수자원 부존량과 이용 가능량의 파악과 평가가 시급하게 되었다.

- 수계 및 하천 시스템 관리 프로그램의 공동개발
미 개척국은 지질조사국과 공동으로 1992년부터 이러한 필요성에 부응한 하천유역관리 분석도구의 개발을 기획, 1995년부터 서부지역의 San Juan, Colorado유역들에 적용하기 위한 프로그램개발에 들어갔다. 수계/하천 시스템 관리 프로그램(WARSMP: Watershed and River Systems Management Program)은 유역 단위의 물과 환경 자원관리 지원목적의 분석도구로서 물리적 수문학적 거동을 모의하는 수계모형과 하류의 물 사용량을 고려한 저수지 운영 모형, 하천 수리 및 상류 흐름 조건에 따른 구간단위의 생화학적 모의모형들이 하나의 시스템으로 결합된 것이다. 현재 이 프로그램은 개척국이 운영하는 댐저수지군을 중심으로 한 유역단위 수자원 계획 및 관리(물 배분 의사결정)에 활용하고 있으며 다른 모형과의 연계 및 사용

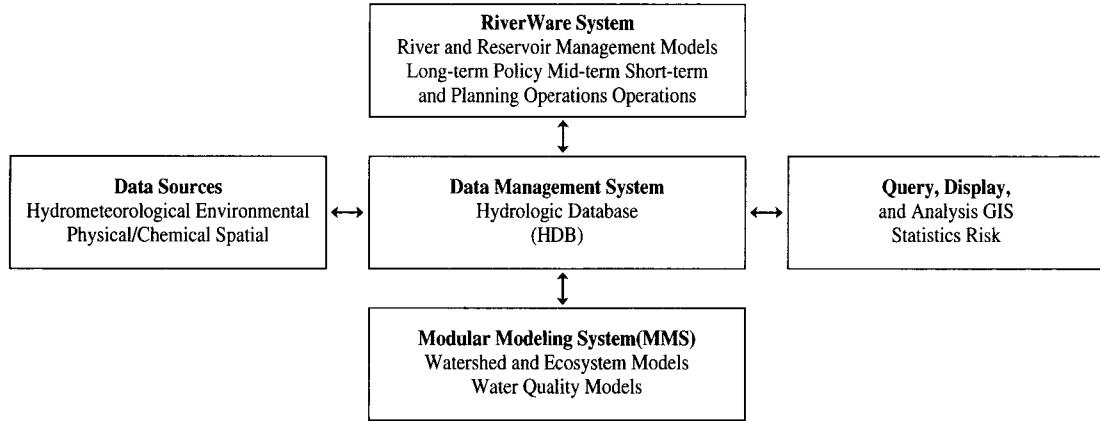


그림 2. USBR/USGS의 데이터 중심 하천유역물관리 의사결정 지원시스템 개요

을 위해 필요한 소프트웨어와 모형의 개발을 지원하기도 한다(Frevert 등, 2000).

- 데이터 중심의 의사결정지원 시스템

이 프로그램의 핵심은 시스템 안에 결합된 MMS, RiverWare와 같은 주요 분석도구들이 공통의 데이터베이스인 HDB(Hydrologic DataBase)에 연결된 데 있다. 이 HDB는 주로 수문 시계열 자료, GIS 속성자료, 통계정보, 그밖에 수자원관리 활동과 관련된 필요자료들을 저장하기 위한 것으로 관계형 DB(relational data base)로 설계되었다.

이러한 연계는 그림 2에 도시된 바와 같이 데이터 중심의 하천유역물관리 의사결정지원시스템(DSS)을 제공하는 것으로 한 모형의 출력결과가 데이터베이스에 기록되어 다른 모형의 입력자료로 사용될 수 있다. HDB는 또한 개별 모형수행에 필요한 보조적인 도구들(GIS, 통계 분석, 자료 검색 및 화면에 나타내기 기능 등)에도 연결이 되어 있다. 이중 GIS 모듈은 분포형 모형의 매개변수 값을 정의하는 자동화된 방법, 시각화하여 동영상을 보여주는 도구, 모의된 수문학적 변수들의 분포를 시공간적으로 분석하는 등의 기능들을 제공하며, 이러한 변수들의 시공간적 변화를 고려한 비교 평가 등을 통하여 의사결정지원시스템이 개선된 방법으로 장기 수자원 계획 및 정책 결정 및 중단기 저수지군 운영계획 수립업무를 수행하게 한다.

- MMS(Modular Modeling System)

미 지질조사국이 콜로라도주립대의 CADSWES(Center for Advanced Decision Support for Water and Environmental Systems) 전산팀과 함께 개발한 MMS는 유역유출 모의를 중심으로 한 통합 컴퓨터 소프트웨어로서 모형의 틀을 제공한다. 이 MMS는 물, 에너지, 그리고 생물지질화학적인 다양한 과정을 모의하는 모형을 개발, 적용하기 위한 것으로 그림 3과 같이 '전처리', '모형' 그리고 '후처리'라는 3요소로 구성되어 있다. '전처리' 과정은 모델링에 필요한 시공간적 계열자료 제공, 자료입력, 분석하는 도구들을 포함하고 있으며, '모형' 과정에서 모듈화된 분석 모형을 선택, 모형구축 및 적용을 수행한다. '후처리' 부

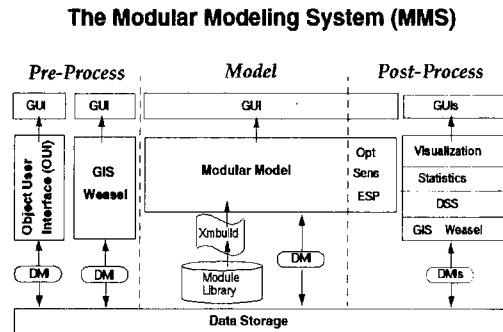


그림 3. MMS 구성요소의 모식도

분은 모형의 결과를 시각화하고, 통계분석하는 도구를 제공하며, 그 결과를 관리 모형이나 HDB에 전달한다. 세 부분 모두 GUI와 자료 처리 인터페이스(DMIs: Data Management Interface)를 포함한다(Leavesley 등, 1998)

그림 3에 도시된 바와 같이 모형부분의 주요한 특징으로 모듈 라이브러리(Module Library)가 있으며 이 안에 유역유출모의와 관련된 다양한 모듈들이 들어 있다. 사용자는 Xmbuild라는 모형구성 인터페이스를 통해서 필요한 모듈을 선택하고 연결함으로써 원하는 모형을 구성할 수 있다. 또한 GIS Weasel이라고 불리는 GIS 인터페이스가 MMS의 전처리와 후처리과정의 일부분을 구성하고 있는데, 이 Weasel은 모형을 쉽게 개발할 수 있도록 지원해 주며 유역유출 분석 도구로 사용될 수 있다. 즉, 유역에 대한 수치 표고 모형을 Weasel에 대한 입력 자료를 제공함으로써 분석대상 유역이나 소유역들을 자동적으로 분할, 설정할 수 있다.

- RiverWare 시스템

RiverWare 시스템은 미 개척국과 TVA가 콜로라도주립대의 CADSWES 전산팀과 공동으로 90년대에 7년여에 걸쳐 개발한 범용의 하천 및 저수지관리모형 개발도구로서, 유역의 특성을 반영하여 개발된 모형은 중장기 저수지 운영계획 수립 및 단기 저수지 물배분 의사결정을 지원한다(Zagona 등, 2001). C++와 객체지향적인 프로그래밍 언어를 기반으로 하는 RiverWare로 모형을 구축할 때 사용자가 직접 기본적인 하천 시스템의 네트워크를 구성하는 데, 여기에는 저수지, 취수지점, 하천 구간, 합류점, 기타 구성요소들을 포함하게 된다. 각 요소들과 연관되는 입력자료는 화면상에서 표(spread sheets)의 형태로 입력가능하며, 데이터베이스(HDB)를 통해서 곧 바로 입력할 수도 있다. 유역내의 저수지 및 다른 시스템 요소들과 관련된 운영 정책과 운영률(rule)들은 기존의 제약조건 편집기에 의해서 RiverWare에 추가로 입력하게 된다.

이 RiverWare는 단순 저수지 모의운영기법, 운

영률 기반 모의운영기법, 선형 목표계획법(Linear Goal Programming)을 이용한 네트워크 물배분 등의 모델링 방법을 적용하고 있으며, 그림 2, 3에 도시된 바와 같이 일련의 DMI를 통한 HDB와 밀접하게 연계된 모형분석을 통하여 유역 수자원 관리자와 기술자들의 저수지군 운영을 위한 의사결정도구로 활용되고 있다.

- 하천 유역에의 적용사례

개발된 WARSMP는 1995년 이래 San Juan과 콜로라도 하천유역에 적용되었다. 아리조나, 콜로라도, 뉴 멕시코, 유타 주에 걸쳐 콜로라도 강의 주요 지류인 유역면적이 59,570km²의 San Juan 유역에선 수질문제, 멸종 동식물 보호, 콜로라도와 뉴 멕시코 주간의 물배분 협약관련 문제 조정해결에 이 프로그램을 집중적으로 사용하였다. 콜로라도강 유역에선 기존의 CRSS(Colorado River Simulation System)의 운영률들을 RiverWare의 운영률기반 모의운영모형에 대체해서 장기 수자원계획 수립 및 정책 입안업무와 중기 운영계획설정 (24개월간)에 적용한다. 이러한 개척국의 모의운영형태로의 적용은 최적화알고리즘의 문제라기 보다는 콜로라도강에서의 협약된 방류방식(rule)을 따르기 위한 조치이다. Hoover댐의 경우 단기 저수지 방류의사결정(일단위와 시간단위)에 이 시스템을 활용하고 있다.

최근에는 뉴 멕시코주의 Rio Grande 유역과 네바다주와 캘리포니아주의 Truckee하천유역의 물관리에도 적용되어 이 지역의 농업용수, 생활용수, 위락, 수력발전 및 수질환경용수 수요에 따른 물사용을 둘러싼 물 배분을 조정하기 위하여 단기 유역 수자원 부존량과 이용 가능량의 파악과 평가, 물배분의사결정지원에 이 프로그램을 활용하고 있다.

이렇듯 미국 연방정부의 대표적인 물관리 및 조사기관인 개척국과 지질조사국은 1990년대 초반부터 공동으로 유역 단위의 물과 환경자원 통합관리를 목표로 수계/하천시스템관리 프로그램인 WARSMP를 별도로 구성된 외부 전문가 Panel의 조언을 받아가면서 일관성을 갖고 꾸준히 개발, 수

정, 보완해 오고 있다. 또한 다수의 하천유역을 대상으로 개발된 프로그램을 적용, 검증하고 있으며, 특히 콜로라도강 유역의 경우 유역내 연방정부와 주정부의 물관리기관들과 산학연 수자원 관련자들의 자발적인 참여로 구성된 사용자그룹과 실무그룹의 적극적인 활동을 통하여 WARSMP라는 공동의 분석도구를 사용하여 유역의 물문제를 함께 해결해 나가는 바람직한 본보기가 되고 있다.

앞으로도 이 연방정부의 수자원전문기관들은 이미 개발된 프로그램인 MMS와 RiverWare의 기능을 보강해 나가려 하며, 아울러 수질분석 모형, 추계학적 수문분석모형, 사회경제분석 모형들을 시스템에 추가시킬 계획이다.

4.2 TVA

- 유역통합 물관리환경

테네시강 유역은 미국의 남동부 7개 주에 걸쳐 있으며 면적은 106,000km²으로 우리나라 남한의 면적보다 약간 더 넓다. 미시시피강 합류직전에서 오하이오 강과 합류한 후 미시시피강으로 흘러가는 테네시강 유역의 연평균 강수량은 1,300mm이고 유출량은 560mm로서 유역의 평균 유출율은 43%이다. 연평균 강설량은 약 20cm정도이지만 snowpack을 형성하지는 않는다. 유역의 강우량은 연중 고른 편이지만 하천의 유출량은 겨울철인 12월-4월경에 많으며 여름과 가을에는 하천의 자연유출량이 매우 적은 편이다.

1933년 당시 사회·경제적으로 침체된 테네시강 유역의 경제와 사회발전을 도모하기 위해 TVA Act에 의해 설립된 연방정부기관인 TVA는 테네시강의 적절한 이용을 위한 계획, 보존 및 자연자원의 개발의 임무를 부여받았다. 이러한 임무는 홍수조절, 주운, 전력생산, 토양침식의 저감, 입야복원, 유희지의 농업활동 금지, 산업유치와 다양화, 그리고 지역 사회개발 등을 통해 이루어져 왔다.

- 저수지군 운영목표

TVA시스템에는 TVA 관할의 45개댐(본류 9, 지

류 36) 이외에도 미공병단과 전력회사 등이 소유한 댐을 포함하여 현재 60개의 댐이 운영중이며, 총 저수용량은 약 169억m³으로 이것은 연평균 유출량의 약 30%에 해당한다. TVA 저수지군 운영목표의 우선순위는 홍수조절, 주운, 그리고 수력발전이다. 레크리에이션, 어류와 야생동물 보호, 수질보전, 용수 공급, 기타 저수지 수위변동에 의한 모기와 같은 곤충번식의 억제도 저수지운영의 중요한 목표들이다.

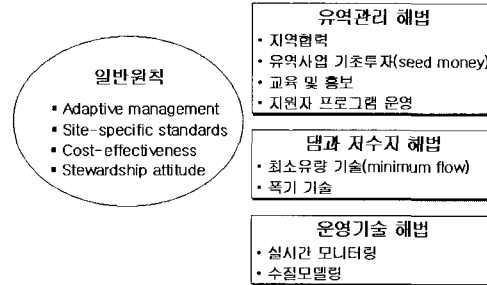
저수지운영은 특히, 겨울철의 홍수조절과 갈수기인 여름-가을 동안 주운 수위 보장을 위한 하천유출량 증가, 전력생산, 그리고 여름철 레크리에이션용 수위유지 등에 초점을 맞추어 이루어진다.

- 물관리시스템 구축 현황

TVA의 물관리시스템은 WaterView, RiverWare, Terra로 구성된다. 즉, 물관리를 위한 scadar system으로서 WaterView, 저수지와 하천운영을 위한 의사결정지원 모형인 RiverWare와 함께 물관에 관련된 정보를 intranet 기반으로 공유하기 위한 물관리 portal site역할을 담당하는 Terra가 상호 연계되어 사용된다.

TVA 저수지군의 운영계획수립은 RiverWare를 중심으로 수행된다. 1996년 이후부터 TVA의 60여개 저수지군의 실시간 운영계획을 수립하기 위한 의사결정지원모형으로서 도입된 이래 RiverWare는 전체 운영팀에서 실제 활용되고 있다. 분석되는 전체 기간은 14일 동안을 대상으로 하며 최적화 모형 수행시에 적용되는 저수지 수위의 guideline은 오랜 경험과 기술적인 검토로 결정된 운영률로서 제시되는 기준수위가 사용된다. 14일 간의 기본적인 발전 운영계획은 6시간 간격으로 결정되며 이는 RiverWare를 수행하는 시스템에서의 해석시간에 의해 결정된다. RiverWare의 수행은 2단계로 이루어진다. 즉, 최적 운영모형(선형목표계획기법 기반) 수행으로 1차적인 방류계획과 댐 저류량이 결정된 뒤, 모의운영모형을 적용하여 운영계획을 수립한다. 이때 모의운영 모델링을 하는 이유는 사용하는 최적화 기법이 LP계열 모형이므로 선형화 단계에서 파

생되는 오차항을 제거하기 위한 것으로 이러한 단계를 걸쳐 댐운영 실무자가 손쉽게 모형에 접근할 수 있도록 한다. 매 6시간 간격의 운영계획은 평갈수기 이수목적 운영단계에서의 의사결정을 위해 적용되며, 홍수기 하류 수위 및 유량에 대한 정밀검토를 요할 때에는 1시간 시간간격의 동적 하도추적모형을 수행하여 별도로 적용하고 있다.



- 하천환경을 고려한 물관리

그림 4와 같이 TVA의 하천환경과 수질을 고려한 유역 물관리는 유역관리 해법, 댐과 저수지 해법 및 운영기술 해법으로 추진된다.

TVA는 테네시강수계를 611개의 소유역 수문단위로 나누어 저수지와 하천의 건전한 상태, 하천변의 식생상태, 수질평가 등을 토대로 유역의 수자원 상태를 평가하고 있으며, 이를 유지관리 또는 개선하기 위한 최적의 방안을 도출한다.

TVA 하천환경관리 중 댐과 저수지 해법은 크게 2가지로 구분된다. 첫째, 하천의 생태환경과 수질을 보전하기 위한 적정량의 최소유량(minimum flow)의 산정과 보장이며, 둘째, 댐 방류수의 용존산소 농도를 적정하게(목표농도 6.0mg/L) 유지하기 위한 폭기시설의 설치·운영이다.

TVA는 하천 최소유량과 각종 폭기설비의 운영과 효과분석을 위해 실시간 수질(수온, 용존산소) 모니터링과 수질모형을 개발, 활용 중에 있다. 저수지 방류수의 수질상황은 Terra를 통해 실시간으로 감시되며 용존산소 농도가 기준치이하로 떨어지면 폭기시설을 가동한다.

TVA에서 구축하여 활용중인 수질모형은 1차원 하천 수리·수질모형인 ADYN-RQUAL, 2차원 저수지 수리·수질모형인 CE-QUAL-W2, 3차원 모형인 PHOENICS가 있다. ADYN-RQUAL은 하천의 수온, 용존산소, CBOD, NBOD를 동적해석을 위해 사용되며 각종 폭기설비운영의 효과분석 등에 활용된다. 수형방향 평균 x-z 2차원 모형인 CE-QUAL-W2은 미공병단에서 개발한 모형을 수정하여 사용하고 있다. W2모형은 저수지내 폭기설

그림 4. 하천환경을 고려한 물관리의 원칙과 해법

비의 위치 등 설계와 효과분석 및 저수지 물고기 서식환경 개선을 위한 폭기설비 설치효과 분석 등을 위해 활용된 바 있으며, TVA의 저수지 수질환경관리를 위한 기본모형으로 활용되고 있다. PHOENICS는 저수지 댐측 부근에 설치된 표층수 혼합 펌프(surface water pumps)의 효과 분석을 위해 활용되고 있다.

4.3 미 환경청

미국의 유역내 수자원통합관리는 크게 이수와 치수를 포함하는 수량관리와 수질과 생태계보존을 포함하는 환경관리로 나뉘어져 이루어지고 있다. 수량관리에서 이수부문의 통합운영은 주별로 수립된 수리권과 주간 협약 등을 통해 유역단위로 관리되며, 홍수부문의 통합관리는 공병단이 주도적으로 수행하고 있다. 미환경청은 오염물질 생산과 수질환경악화를 방지하기 위해 맑은물 법(Clean Water Act), 음용수 안전관리법(Safe Drinking Water Act) 등과 같은 각종 환경관령 법들을 입법하고 있으며, 이러한 법의 집행을 원활히 추진하기 위해 유역통합관리기술을 개발하여 주정부 또는 지자체를 지원하고 있다. 미환경청이 각 주정부의 유역별 수질관리를 지원하기 위해 시행하고 있는 프로그램은 오염총량관리제, 맑은물 법안 319항에 따른 비점오염원 관리프로그램 구축, 수질감시, 맑은 호수 프로그램(Clean Lake Program), 하천, 강, 호수, 습지 등의 생태계 복원사업 등이 있다.

- 유역 수질관리기술 현황

유역에서 발생하는 생활, 공업, 농업, 축산 등 다양한 오염물질이 자연계에서 물리적, 생물학적, 화학적으로 반응하고 소멸하는 과정을 추적하고 모의하는 것이 수질모델링 기술이다. 수질모델링 기술은 유역의 수질통합관리기법 개발에 중요한 도구로 사용되며, 특히 오염총량관리제의 시행에 필수적인 기술요소이다. 기존의 수질모형은 유역, 하천, 저수지 등에서의 오염물질 유입과 반응에 의한 수질 변화를 독립된 모형으로 모의하였으나, 최근에는 하나의 통합모델링시스템(Integrated Modeling System)으로 구성하여 공통의 인터페이스 구축을 통한 효율적이고 연속적인 분석이 가능하도록 하고 있다. 현재 미 환경청은 점 및 비점오염원 부하량의 규제 및 할당을 위한 오염총량관리제도의 시행을 지원하기 위한 통합모델링 도구로서 BASINS(Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources)을 개발하여 활용 중이다. BASINS는 지리정보시스템(GIS)을 이용한 오염원과 수질자료의 조회와 분석기능을 갖고 있으며, 유역, 하천, 저수지의 수질모형을 이용하여 오염물질의 발생과 하천 수계에 미치는 영향을 정량적으로 모의한다.

BASINS에 포함된 자료의 분석 요소기능은 유역의 지리 및 환경정보, 수질 평가 도구(TARGET, ASSESS, and DATA MINING), 지역별 수질 측정자료의 전송 및 유지를 위한 활용도구, 배수구역 구분 도구, DEM, 토지이용도, 토지피복 및 수질 자료의 분류 기능 등이다. 또한 모델링 요소로는 하천의 수질모의 모형인 QUAL2E, GIS 기반의 비점오염원 모델인 PLOAD, 오염원 발생 및 이동 모의를 위한 2개의 유역모델인 HSPF와 SWAT가 있으며, HSPF/SWAT 후처리 및 시나리오 생성 기능(GenScn), 모의결과의 보고서 작성을 위한 지도, 그래프 및 보고서 서식 제공 도구를 갖추고 있다. BASINS는 ESRI에서 개발된 GIS 도구인 ArcView를 기반으로 구성되었으며, 통합된 시스템 안에서 다양한 기능들을 모두 수행할 수 있어 유역

수질관리를 위한 유용한 도구로 사용된다.

4.4 유럽연합

유럽연합은 지식기반경제시대에 대응하여 유럽통합을 가속화시키면서 국제사회의 중심세력으로 나서고자 회원국들을 중심으로 한 European Research Area(ERA)를 설정하고, 1984년부터 5차에 걸쳐서 범 EU차원의 핵심연구개발 사업인 EU Framework Program을 수행해 오고 있다. 이러한 노력의 일환으로 1990년대에 하천유역계획용 의사결정지원시스템인 Waterware가 개발되었다. 또한 지난 2000년 10월 23일, 유럽 의회와 집행위원회는 Directive 2000/60/EC을 통해서 “물관리구조개편 지침” 즉, EU WFD를 최종적으로 채택하였다.

이 WFD의 이론적 논리는 수자원을 효율적으로 관리할 수 있는 지리적 단위가 하천유역이라는 인식에서부터 출발한다. 최종 목표년도 2015년까지 매 중간 단계마다 각 회원국 정부가 의무적으로 달성해야 할 목표를 설정하고 있으며, 2009년까지 “하천유역관리계획”을 마련하고, 최종 목표년도인 2015년 말까지 제반 환경목표를 달성하고 종료하는 것으로 제시되었다. 이를 위하여 WFD는 수자원과 관련된 국가의 정책, 법적 구조, 논리와 원칙, 환경, 지속가능 목표 등 물과 관련된 제반 정치, 경제, 사회, 환경, 기술적 요소를 통합한다. 따라서 유럽연합의 회원국가들은 그동안 국가별로 단독적으로 추진하던 수자원 정책을 EU차원의 법적, 관리적 의무조항을 담은 WFD의 범위 안에서만 가능하게 된다(박성제 등, 2002).

- Waterware : 통합 하천유역계획을 위한 의사결정지원시스템

Waterware는 1992년부터 5년간 영국, 이태리, 아일랜드, 오스트리아의 연구집단이 공동으로 수행했던 EUREKA EU 487 Project의 산출물이다. 하천유역관리자가 수량과 수질, 수환경을 고려한 효율적인 수자원관리를 할 수 있도록 지원하기 위하여 분석도구는 주로 다음 용도의 통합하천유역계획

수립 업무에 활용하고자 개발되었다.

- 수자원계획 입안시 개발의 한계를 결정,
- 새로운 환경입법의 영향 평가,
- 신규자원의 개발전략수립,
- 수자원 개발에 따른 환경적 영향 평가,
- 하천 및 지하수 오염제어 전략 수립

제5세대 hydroinformatics 시스템인 이 Waterware에서는 그림 5의 시스템 구조도와 같이 GIS, 데이터베이스 기술, 모델링 기법, 최적화 기법과 전문가 시스템 기법을 복합적으로 수행할 수 있도록 설계되었다. 모의운영모형 등의 모델링기법을 이용하여 각종 분석대안의 결과를 예측함과 동시에 최적화 기법과 전문가 시스템을 합성시킨 인공지능 기법을 이용하여 최적의 대안을 선정할 수 있도록 지원한다.

이 시스템은 GIS, 지리 정보 기반의 데이터베이스와 포괄적인 하천 네트워크 편집기능 등으로 구성되어 있으며 지하수와 지표수 오염제어, 수요 예측, 수자원 계획 및 수문학적 모의해석 등의 기능을 포함한 다수의 분석 도구들과 연계되어 있다. 새로운 구성 요소들이 기존에 사용되는 인터페이스와 부합한다면 필요시 현재 사용중인 모형을 대체하거나 더 많은 모형을 추가하는 데에도 제약을 받지 않는다. 궁극적으로는 각 구성요소에서 자료의 이용가능성과 요구되는 정도 수준에 맞추어 여러 개의 모형에서 한가지를 선택하여 사용하게 된다.

- 하천 유역에의 적용사례

Waterware는 영국 남부의 런던을 포함한 유역면적 13,000 km² 인 테임즈강 유역을 대상으로 prototype 시스템을 구축하여 시스템의 여러 구성요소들을 개발해 가면서 이 DSS의 적용가능성을 검토하였다.

그후 Waterware는 멕시코의 Rio Lerma 유역/Lake Chapala의 수자원 계획에 적용되었다. 멕시코 중부 고원지대에 위치한 인구 850만, 유역면적 52,000 km²인 Rio Lerma 유역의 상류에 위치한 Tuluca 등 대도시와 공업단지가 밀집한 지역으로

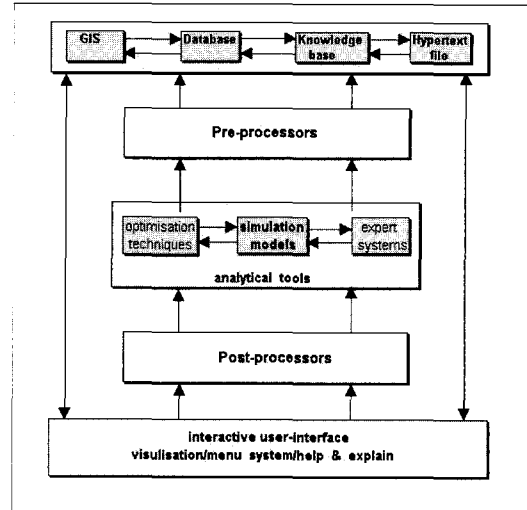


그림 5. Waterware 시스템 구조

불충분한 생활하수 산업폐수처리 기반으로 인하여 수질오염이 심각한 곳에서 이를 개선하기 위한 신규폐수처리 확충에 의한 유역 하천수질 오염제어 전략을 수립하였다. 그밖에 Waterware는 팔레스타인 지역의 수자원계획입안에 적용되기도 하였다.

5. 결론

지금까지 살펴본 미국과 유럽의 기술개발 동향과 같이 그동안 선진국에서는 수량의 안정적인 확보와 함께 수질과 하천환경을 고려한 지속가능한 수자원 관리기술 연구개발에 막대한 투자와 노력을 기울여 왔으며, 앞으로도 이러한 유역단위의 통합수자원관리 기술 구축에 더욱 박차를 가해서 추진해 나갈 것으로 전망된다.

미국의 경우 국가적인 차원에서 물관련 연방정부 기관들인 개척국, 지질조사국, TVA들이 공조해서, 유럽의 경우 범국가적 차원에서 유럽연합의 회원국들을 중심으로 수량과 수질 관련 모형을 포함한 유역물관리 시스템의 공동개발 및 공유 등을 통한 통합수자원관리 기술을 확보하려는 노력은 특기할 만 하다.

우리나라에서도 국가위기관리의 차원에서 여전히 취약한 유역단위의 통합수자원관리 기반기술을

구축해 나가기 위하여 좀 더 과감하고 일관성 있는 투자와 노력이 요구된다. 따라서 물관련 기관들과 수자원 분야에 종사하는 과학기술자들이 종래의 용수공급이나 수력발전 등 단일목적의 수량관리 중심의 운영을 탈피하여 하천의 수량, 수질, 환경생태를 동시에 고려한 유역단위의 통합운영을 구현할 수 있도록 관련 핵심기술개발을 서두를 때이다.

이러한 기반기술개발은 유역통합 물관리를 위한 장단기 수문기상 예측기술, 지표수와 지하수 수문 성분 해석기술과 하천흐름 해석기술 등 관련 기술 및 수자원정책개발과 병행하여 추진되어야 하며, 통합 또는 연계운영으로 인한 효과를 확인하기 위해 지속적인 현장관측 등의 검증작업이 필요하다. 또한, 유역의 수량, 하천수질, 비점오염원 거동 해석분야에 대한 체계적이고 유기적인 협력연구를 통

해 일관성 있는 연구개발이 지속적으로 수행될 수 있도록 해야 하며, 이미 안정화, 실용화단계에 있는 외국 선도그룹과의 전략적 Benchmarking을 통한 국제공동연구를 수행하는 것이 필요하다.

이러한 새로운 패러다임의 유역통합물관리를 단계적으로 성공리에 정착시켜 나감으로서 물이용 효율의 극대화와 함께 공평하고 지속가능한 수자원의 이용과 관리가 가능해 질 수 있으며, 항상 요원하게만 느껴지던 우리나라의 수자원관리기술을 선진국의 반열로 올려 놓을 수 있게 될 것이다. ●

<감사의 글 : 본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-6-1)에 의해 수행되었습니다.>

< 참고문헌 >

- 고익환, "수공이 구축해 나가야 할 국가 물관리 시스템", 수자원 제 360호, 1997.12.
- 고익환, 최병만, 박재영, "새로운 패러다임을 반영한 통합수자원계획의 국내 적용방안", 2001 한국수자원학회 기초과제 연구보고서, 2002.2.
- 박성제, 이재웅, 박두호, 이진희, "수자원관리의 이념적 변화와 국제적 추세 - 물관련 국제회의를 중심으로 -", 한국수자원학회지 제 35권 3호, 2002. 5.
- 박희경, "지속가능한 수자원 개발을 위한 통합자원계획도입의 필요성", 대한토목학회지 제 46권 9호, 1998.9, pp.36-45.
- Agenda 21, "The Rio Declaration on Environment and Development", the United Nations Conference on Environment and Development(UNCED), Rio de Janeiro, Brazil, June 1992.
- Beecher, J.A., "Integrated Resources Planning Fundamentals", Journal of American Water Works Association, June 1995.
- European Commission, "Towards Sustainable Water Management", 1998.
- Frevert, D., Lins, H., Fulp, T., Leavesley, G., and Zagona, E., "The Watershed and River Systems Management Program - An Overview of Capabilities", Proceedings of the Watershed Management & Operations Management 2000 Conference, American Society of Civil Engineers, June 20 - 24, 2000, fort Collins, Colorado.
- Global Water Partnership, "Integrated Water Resources Management", TAC Background Papers No.4, 2000.
- Leavesley, G., Markstorm, M., Brewer and R. J. Vigor, "The Modular Modeling System - The Physical Process Modeling Component of the Watershed and River System Management Program", Proceedings of the First Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference, 1998.
- Savenije, H.G., "Water and Environmental Resources Management - How to cope with our ever increasing demands?", Annual Conference of the Korea Water Resources Association, Gangneung, Korea, May 1996.
- WCED, World Commission on Environment and Development, "Our Common Future", Report of "the Brundtland Commission", Oxford Press, Oxford, UK, 1987.
- Zagona, E., Fulp, T., Shane, R., Magee, T., Goranflo, H., "RiverWare, A Generalized Tool for Complex Reservoir System Modeling", Journal of the American Water Resources Association, August 2001.