

학술 기사



# 통합수자원관리 기반기술 구축방안(II)

## 우리나라의 하천유역 통합물관리 기반기술 구축방안

고 익 환 (한국수자원공사 수자원연구소 부장)

정 세 웅 (한국수자원공사 수자원연구소 과장)

### 1. 서론

21세기에 들어서 더욱 강도 높게 빈번해 지고 있는 가뭄과 홍수 발생, 필요한 신규 수자원개발의 어려움과 공급 증가에 소요되는 비용 급등, 한정된 수량의 동일 수자원에 대한 다양한 용도간의 경쟁, 수질관리의 막대한 고비용, 물부족과 수질오염을 둘러싼 이해당사자간, 지역 간의 첨예한 갈등과 분쟁 등으로 인하여 물 문제 해결을 위하여 국가와 지역 주민이 치러야 할 사회적 비용부담은 이미 위협수위에 이르게 되었다. 이러한 국가적 물의 위기를 슬기롭게 극복해 나가기 위하여 이미 개발된 각 유역 내 수자원시설물들을 최대한 효율적으로 활용하기 위한 하천유역 통합물관리 기반기술의 확보와 운영체제 구축이 더욱 절실히 요구되고 있다(고익환 등, 2002).

우리나라에서 한해에 사용하는 수자원 총량 약 330억<sup>m</sup> 중 40% 이상을 댐에 의한 공급량이 접하고 있어 댐공급에 의한 용수의 이용률이 매우 높은 편이다. 2002년 현재 운영되고 있는 전국 14개 다목적댐의 홍수조절용량은 총 27.3억<sup>m</sup>이며 연간 용수공급능력은 약 110억<sup>m</sup>에 달한다. 또한 홍수기를 제외한 대부분의 기간 동안 한강을 비롯한 주요하천의 수량과 하천의 자정능력은 유역 중상류에 위치한 대용량 다목적댐 저수지군의 공급량에 의해 조절되고 있으므로 보다 효율적인 하천의 물관리를

위해서는 다목적댐 저수지군 운영을 중심으로 한 유역 혹은 범유역단위 하천운영시스템의 구축이 필수적이다. 특히 지속적인 환경기초시설 투자에도 불구하고 물 사용량의 급증, 산업화·도시화와 맞물려 쉽게 개선되지 않고 있는 갈수기 하천수질을 요구되는 목표수질 수준으로 유지하기 위해서는 보다 많은 하천유지유량의 확보와 수계단위 오염원 관리, 하천수질환경을 고려한 과학적인 물관리 기술개발이 요구된다.

이 글에서는 우리나라의 하천유역 운영 현황과 문제점을 살펴보고, 수자원 공급원의 89%를 차지하는 다목적댐 저수지군과 인접하천의 유역단위 연계 운영을 중심으로 한 한국형 하천유역 통합물관리 기반기술 구축방안을 현재 한국수자원공사가 수자원의 지속가능한 확보를 위한 21세기 프론티어 연구개발사업의 일환으로 수행중인 “실시간 물관리 운영시스템 구축” 세부과제의 구상을 중심으로 제시코자 한다.

### 2. 우리나라의 하천유역 물관리 환경과 운영체제

물관리는 각종 용수(생활·공업·농업·유지)를 안정적으로 공급하기 위한 이수측면과 홍수피해를 최소화하기 위한 치수측면을 포함한 수량관리와 맑은 물 공급, 친수환경 조성, 생태계 보존을 위한 수질환경관리로 구분할 수 있다. 이러한 이수와 치수

의 수량관리나 하천의 수량과 수질환경관리는 상호 유기적으로 매우 밀접하게 연관되어 있으며, 상·하류의 상관성과 물자원의 수요와 공급의 시간적 공간적 변화를 고려한 유역내, 유역간 물배분과 물이동을 고려해야 하므로 유역 혹은 범유역 단위 통합 물관리가 필요하다. 그러나 국가의 물관리 업무가 기능에 따라 건설교통부, 환경부, 농림부, 산업자원부 및 행정자치부 등 정부의 각 부처별로 다원화되어 있고, 수량과 수질이 별도로 관리되고 있으며, 하천관리가 행정구역별로 이루어지고 있는 현행 물관리 운영여건에서 이러한 유역단위의 바람직한 통합 물관리를 제대로 수행해 나가려면 정부의 유관기관들과 지자체, 지역주민간에 필요한 물관련 정보의 공유하고 상호 협력하는 유기적인 협조체계와 이를 뒷받침하는 기술개발이 요구된다.

그동안 우리나라의 하천은 주로 홍수기 동안의 원활한 홍수소통을 위한 치수위주로 관리되어 왔으며, 이수측면에서는 주로 유수의 점용에 대한 허가사항만 관리되어 왔다. 이미 한강 등 주요 하천수계의 분류에서 유수점용을 허가할 수 있는 자연유량은 소진된 상태이며, 추가적인 용수수요는 대부분 다목적댐에 의한 공급에 의존하고 있다. 그러나 유역 물관리에 필요한 하천의 실시간적인 유량과 취수량 자료 취득체계가 확보되지 않아 수계내 주요 제어지점이나 소유역 구간별 현재의 이용가능한 수량이나 물 사용량 파악이 매우 어려운 상황이다. 더욱이 하천의 장·단기 연속유출을 모의하고 운영측면에서 용수수요를 예측할 수 있는 기술기반이나 저수지군 연계운영모형, 하천과 저수지 수질예측 모형 등 하천유역의 수량과 수질관리의 사결정을 지원하는 핵심 기술기반도 매우 취약한 형편이며, 하천 유역의 물관련 정보를 종합관리하고 예보를 전담해서 수행하는 전문기관도 없는 실정이다.

이와 같은 문제점들 때문에 다목적댐 저수지운영 방법은 댐저수지 하류부의 하천수량 상태를 고려한 '부족량 공급방법' (deficit supply method)보다는 '일정량 공급방법' (firm supply method)이 채택

되고 있다. 다행히 한강의 경우에는 2000년 1월부터 한강유역 댐통합운영협의회가 운영되고 있어 수계내 주요지점(팔당댐)의 유량상태를 고려한 댐군의 연계운동을 실시하고 있으나, 아직도 연계운동을 위한 기초자료인 유역내 물이용 정보와 기상·수문예측의 신뢰도가 부족하여 그 효과가 미흡한 상태이다.

'부족량 공급방법'은 유역내 물 수요량에 비해 공급량이 부족한 경우에 적용하는 방법으로 저수지 하류지역에서 물 부족이 발생하면 그 양만큼만 저수지에서 용수를 공급함으로써 한정된 가용수자원을 보다 효과적으로 이용할 수 있는 방법이나 이를 구현하려면 보다 정교한 수문기상 관측 해석기술과 용수수요 및 공급예측기술을 요한다. '일정량 공급방법'은 비교적 수량이 풍부하고 수력발전이 상대적으로 중요한 유역에 적용하는 방법으로서 저수지에서 이미 정해진 일정량의 월별 방류량을 의무적으로 방류해주는 방법으로서 용수수급의 측면에서 보면 댐하류부의 유출수문 상황에 따라 무효방류가 생길 가능성도 있다. 우리나라의 경우 늘어나는 다양한 용수수요에 좀 더 적극적으로 대처하면서 특히 극심한 가뭄시 유역 저수지군의 비상운영과 연계한 '부족량 공급방법'에 따른 비구조물적인 유역 물관리 기반기술의 확보가 시급하다.

### 3. 유역단위 통합물관리 기반기술개발 방향

댐과 하천을 연계한 통합물관리 시스템은 유역의 장·단기 용수수급상황을 실시간적으로 파악하고, 수계내 주요 제어지점과 소유역 구간의 하천 유출량을 예측하여 유역에서의 시기별·목적별로 필요한 용수수요를 수질상태를 반영해서 최대한 충족하도록 물을 공급하는 의사결정지원 시스템을 의미한다. 이 시스템 구축에는 수문관측 및 조사, 신뢰도 높은 갈수기 수위-유량 환산기법, 강우예측과 하천의 연속유출해석을 위한 대기-수문모형, 물수지분석모형 (하도추적 포함), 저수지군 연계운영 모형, 하천 수질예측 모형 등 다양한 물관리 핵심 요소기



**■ 약술기사**

통합수자원관리 기반기술 구축방안(II) - 우리나라의 하천유역 통합물관리 기반기술 구축방안

영에 들어가는 ‘하천운영시스템’ 과의 유기적인 연계가 필수적이다. ‘하천운영시스템’ 을 통해 취득된 용수이용자료는 “국가 수자원관리 종합정보 시스템(WAMIS)”을 통해 공유되고 “실시간 물관리운영 시스템”의 유출해석모형과, 저수지운영모형, 수질 예측모형 등에 즉시 제공됨으로써 신속하고 정확한 물공급 의사결정이 이루어지도록 하여야 한다. 또한 최종 결정된 저수지 용수공급계획과 예측된 하천유출량 및 수질정보는 “국가 수자원관리 종합정보 시스템”을 통해 용수사용자, 지자체 및 지역주민들에게 제공될 수 있어야 한다.

**4. 유역단위 통합물관리 시스템 구축방안**

3단계 과제 수행이 완료되는 2010까지의 이 연구개발의 최종 목표는 지표수와 지하수, 수량과 수질을 고려한 하천유역단위의 통합 물관리 운영시스템 구축기술을 개발 확보하는 데 있다. 이 중 지표수를 대상으로 한 2004년까지의 1단계의 과업은 유역 유출분석 시스템, 저수지군의 모의 및 최적화 모형,

물관리 의사결정지원을 위한 수질예측모형, 통합 물 정보 제공시스템의 4개 세부 연구분야를 중심으로 유역 지표수 통합 물관리 기반기술을 구축해 간다.

**4.1 유역유출분석기술 개발**

유역유출분석 기술개발은 대상수계의 주요 지점 별 년, 월, 일별 유출량 등을 수문학적 성분으로 분류하고 이를 공간적으로 정보화할 수 있는 단기 유출 예측 방안을 수립하며, 이에 필요한 분석기술을 개발 하는 것이다. 여기에는 유역의 생공용수, 농업용수 등 각종 용수 수요패턴을 반영함으로써 유역의 가용 수 자원을 정량적으로 평가 할 수 있도록 하고자 한다.

그림 3의 개발구상 흐름도와 같이 유역유출분석 기술개발은 기상예보를 활용한 실시간 또는 단기간(10일 이내)의 용수수요와 공급의 예측기술을 개발 함으로써 한정된 수자원의 효율적 이용을 도모하기 위한 것이다. 이를 위한 기반기술로서 용수수요량(취수량)과 하천유출을 실시간으로 취득·관리하기 위한 물 정보관리기술을 개발하고, 기상정보와 연계된 장단기 하천유출의 예측을 위한 하천의 연속 유출량 예측기술과 유역의 물 배분 및 공급의 최적화를 위한 실시간 물수지 분석 기술을 개발한다. 또한 물 공급 계획 수립을 위한 의사결정과정에서 장기 강우예측의 불확실성을 고려하기 위해 선진국에서 활용하고 있는 확률론적인 하천 유출량 예측 방법인 ESP(Ensemble Streamflow Prediction)기법을 도입함으로써 위험도(Risk)를 고려한 의사결정이 이루어질 수 있도록 한다.

유역유출분석기술개발을 위해 구현하고자 하는 유역통합 물관리 시스템의 핵심요소기술 중 하나가 수문계획의 입력자료로 사용되는 자연유량의 장·단기예측으로 본 연구에서 사용될 기반 유출모형은 SSARR 모형으로 하였다.

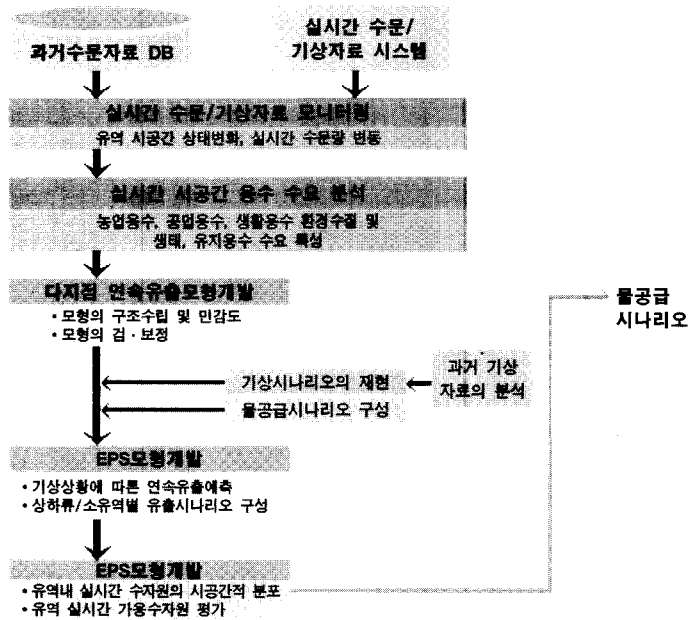


그림 3. 유역유출 분석 기술 개발 추진체계

SSARR 모형에 의한 유입량 예측모형의 내부구조 (infrastructure)는 금강권역 전역에 해당하는 9,800 km<sup>2</sup> 이상의 대유역으로, 실시간 통합 물관리에 사용될 유입량 분석 모형은 국내의 유출모형 현황 조사를 통하여 비교 분석하고 최종적으로 SSARR 기법을 근간으로 수정하였으며, 현재 실시간 통합 유역물관리 시스템과 Hydro Web Data System에 본 연구에서 개발될 Geum River Basin Rainfall Runoff Forecasting System(GRFS)과 결합하는 단계에 있다. 그림 4는 거시적인 GRFS의 과정과 결합된 합수들을 보여준다.

#### 4.2 저수지군의 모의 및 최적화 모형 개발

저수지군의 모의 및 최적화 모형 개발은 장·단기 저수지군 최적 운영방안을 통합 물관리 운영시스템에 제공하기 위한 것으로 수계 물수지 및 하천수질유지유량을 고려한 모의모형과 최적운영모형을 개발하는데 목표를 둔다.

그림 5의 개발 구상 흐름도와 같이 수계 물수지 및 하천의 수질유지를 위한 유량을 고려한 모의모형과 최적운영모형은 장기(월간) 및 단기(일간) 유역 저수지군 운영에 적합하도록 개발한다. 기존의 국내 저수지 운영에서 배제된 유역의 농업용수 등 각종용수 수요패턴을 정량화하여 댐운영계획에 반영하기 위하여 유역유출분석 기술개발팀이 제공하는 각종용수에 대한 수요 예측 정보를 토대로 저수지군의 실시간 모의를 위한 유입량 예측의 신뢰성을 확보하고 유입량자료의 확률통계적 분석능력을 확보하기 위하여 추계학적 유입량 예측모형과 유

입량 갈수빈도 분석 모듈을 개발한다.

월별 최적운영 모형 개발은 ESP기법으로 예측된 유입량 정보를 최적화 기법인 SSDP에 접목하는 기법을 적용한다. SSDP(Sampling Stochastic Dynamic Programming) 최적화 모형의 경우, 궁극적인 목표는 ESP를 이용한 SSDP에 접목시킨 모형이므로 ESP가 개발되기까지는 과거자료를 이

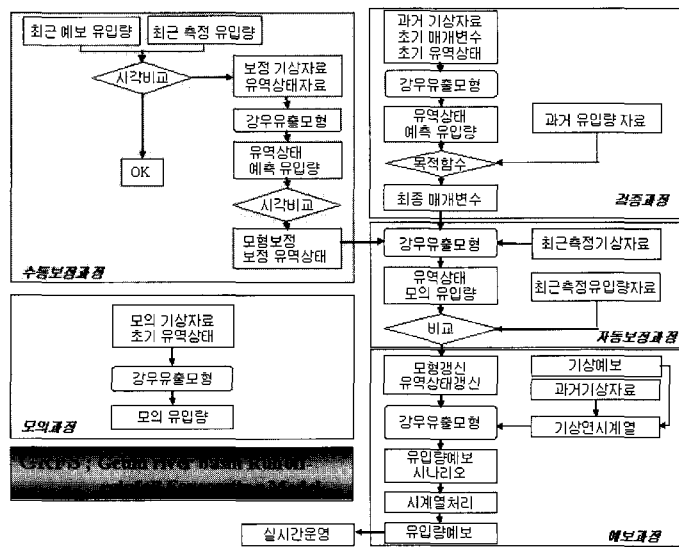


그림 4. GRFS 과정과 연결합수들

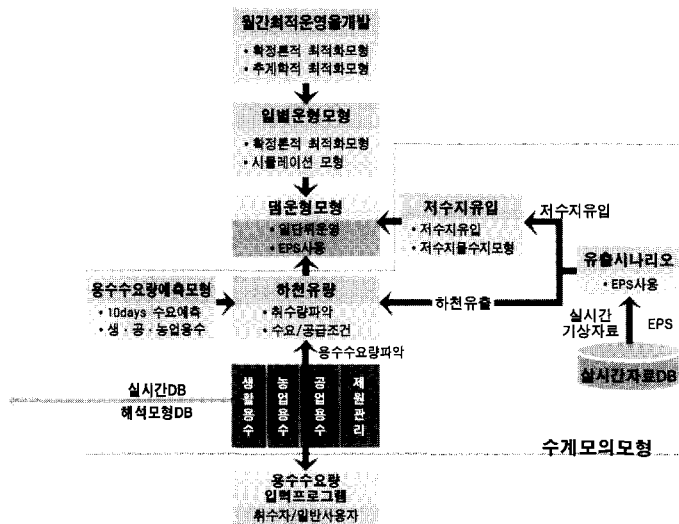


그림 5. 저수지군의 실시간 모의 및 최적화 모형 개발

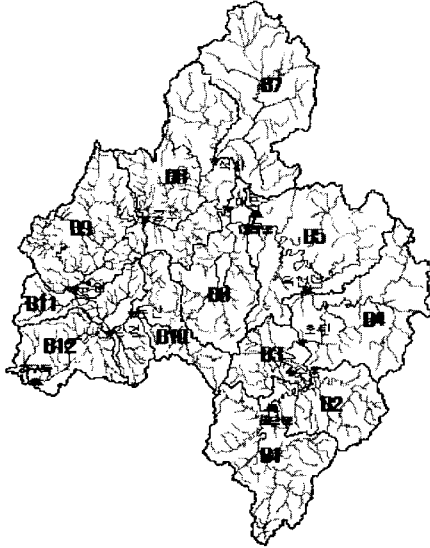


그림 6. 금강수계 소유역 분할도

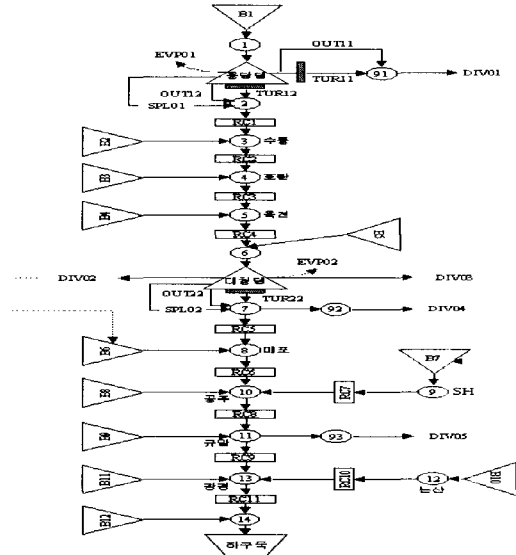


그림 7. 금강수계 시스템 모식도

용한 SSDP모형을 개발하는 연구를 추진할 계획이며, 이후 SSDP에 ESP기법을 접목하고 개발된 운영률에 대한 검증까지 수행한다.

단기 최적 운영모형 개발은 Network Flow에 기초한 MIP(Mixed Integer Programming) 기법을 사용하여 일 단위 댐군 최적 연계운영모형을 설계·구현함으로써 의사결정자의 저수지 운영계획을 실질적으로 지원한다.

대상유역인 금강수계의 소유역 분할도와 저수지군 운영 시스템 구성도는 그림 6, 7과 같이 구성하였다.

#### 4.3 물 관리 의사결정지원을 위한 수질예측 모형 개발

유역의 통합관리측면에서 한정된 수자원을 효과적으로 이용하기 위해서는 유역내 하천의 수량과 수질상황을 고려한 하천운영이 꼭 필요하다.

그림 8과 같이 하천 수질예측 모형은 저수지군 모의 및 최적화 운영모형과 연계하여 하류 수질을 고려한 저수지운영계획 수립을 지원할 수 있도록 정상(Steady) 및 비정상(Unsteady)형태의 수치해석형 수질모형과 시계열·신경망 이론 등을 이용한

통계형 수질예측 모형을 병행하여 개발한다.

정상상태 수질예측모형은 월별 또는 장기적인 저수지운영계획 수립시 또는 하천유지용수량 결정시 활용하며 모형의 매개변수와 입력자료의 불확정성(uncertainty)을 고려할 수 있도록 Monte Carlo 모의기법 등을 개발하여 결정론적인 수질예측을 피하고 현실성 있는 수질예측이 되도록 추진한다.

비정상상태의 모형은 하천의 수리와 수질해석이 통합적으로 이루어질 수 있도록 구축하고 수질오염사고시 또는 갈수기 수질악화시 상류댐의 방류 규모 의사결정을 위해 활용한다. 하천 수질예측모형에 필요한 유출량자료는 연속유출 모형 및 물수지분석 모형과 연계하여 실시간 물정보시스템의 해석모형 DB에서 취득하여 입력자료로 구성될 수 있도록 한다. 또한 비교적 수량과 수질자료가 풍부하고 운영실적이 많은 하천-저수지 구간에 대해서는 시계열 및 신경망 이론을 이용한 통계형 수질예측 모형을 구축하여 유역 수질관리 실무에 활용 가능토록 한다.

#### 4.4 통합물정보 제공시스템 개발

실시간 통합 물정보 제공시스템은 유역의 불관련

정보를 기상, 지표수, 지하수, 대체 수자원 측면에서 수량과 수질을 고려하여 시공간적으로 제시할 수 있는 시스템을 개발하기 위한 것으로서 DB입력 인터페이스와 수자원의 각종 기초자료 DB를 구축하여 유역단위의 통합 물관리를 위한 의사결정 지원 시스템을 구축한다.

1단계에서는 현재 국내·외에서 수자원과 관련하여 사용되고 있는 물정보 시스템들의 성공적인 사례들을 수집하여 분석하고, 포함되어야 할 물정보 시스템의 내용, 구축 우선순위, 개발방향, 시스템 설계 등을 수행 중에 있다.

그림 9의 데이터베이스의 구조도와 같이 이 시스템에는 크게 실시간 자료 데이터베이스, 수문관측자료 데이터베이스, 해석모형 데이터베이스로 구분되어 구축된다.

구축중인 통합 물정보 제공 시스템이 실제적으로 운영이 가능하도록 하천수 사용량에 대한 구체적인 조사를 수행가능케 하는 소프트웨어적인 지원을 하며, 이를 통해서 해당 유역의 수자원 사용실태를 정확히 파악할 수 있도록 한다. 본 과업의 연구자들에게 중요한 의미를 가지는 실시간 수문정보를 제공하며, 이를 Database 형태로 제공하며, SQL 등을 사용하여 직접 사용할 수 있도록 실시간 자료 활용 도구를 제공한다. 이러한 활용 도구는 개방형으로 작성하여 실시간 자료가 연구결과물에 적용될 수 있도록 한다. 또한 대상 유역의 상황을 실시간으로 파악이 가능한 실시간 통합 물정보 시스템을 구축하며, 이를 Web에서 실행이 가능한 형태로 구성한다.

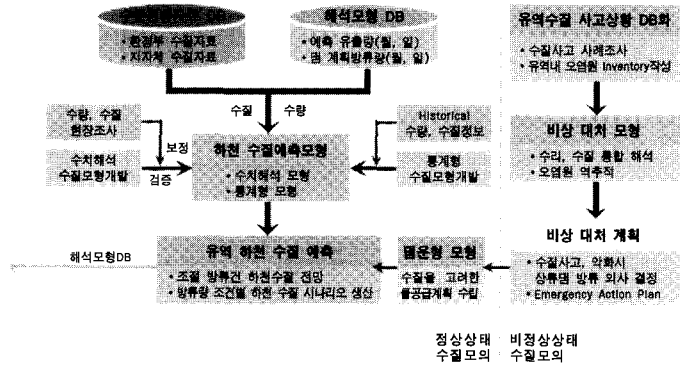


그림 8. 물 관리 의사결정지원을 위한 수질예측 모형 개발

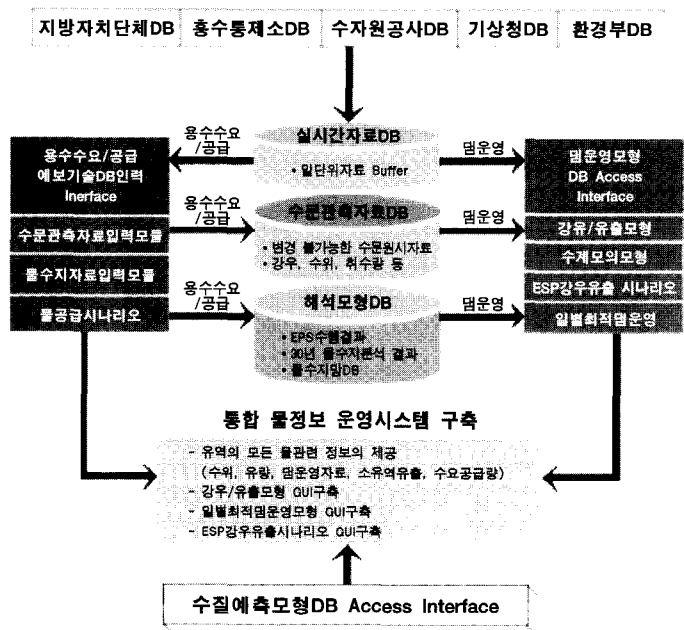


그림 9 통합 물정보 제공시스템 DB 구조도

## 5. 결론

그동안의 단편적인 수자원관리와는 달리 새로운 개념의 통합수자원관리(IWRM: integrated water resources management)는 이러한 수량과 수질환경의 유역단위의 기술적, 제도적 통합 조정관리와 함께 유역내 물자원과 인접 토지자원의 통합관리,

지표수와 지하수의 통합관리를 통하여 국가 및 지역경제 전 분야의 물 이용자들의 이해관계를 가장 합리적으로 반영시키면서 물관리의 지속가능성, 공평성 및 효율성을 동시에 추구한다.

이 글의 1편에서는 하천유역의 통합 물관리 기술 개발 동향을 미국과 유럽의 사례를 중심으로 살펴 보았으며, 2편에서는 이를 참조하여 우리나라의 수자원 공급원의 89%를 차지하는 다목적댐 저수지군과 인접하천의 유역단위 연계 운영을 중심으로 한 한국형 하천유역 통합물관리 기반기술 구축방안을 현재 한국수자원공사가 추진중인 "실시간 물관리 운영시스템 구축" 세부과제의 구상을 중심으로 제시하였다.

1단계에 개발된 시스템이 2, 3단계(2004. 9 - 2010. 8) 기간동안 충분한 검보정과 보완과정을 통하여 실제 물관리에 적용가능 하게 되면 유역내 주요 제어지점과 소유역 구간의 정확한 하천유량과 취수량 정보를 반영한 유역유출 분석, 하천 수질 예측 결과를 토대로 한 장단기 저수지군의 연계운영 기술을 확보하게 되면 명실공히 수량과 수질을 고려한 '다목적 분석기법' 과 '부족량 공급방법' 기반

의 유역 통합 물관리 의사결정이 가능해짐으로써 우리나라 수자원관리 기술을 선진화하는 중요한 전기를 마련할 수 있을 것이다.

향후 이 연구사업의 범위는 2004년 이후의 2, 3 단계에서 과정에서 유역내 토지이용을 고려한 물자원과 인접 토지자원의 통합관리, 유역 지표수와 지하수의 통합관리, 지하수, 수계 오염원 현황과 제어를 고려한 수량과 수질 통합관리관리를 지원하는 운영기술 개발로 확장된다. 개발되는 시스템은 하천-저수지 운영자, 그리고 하천과 저수지에서 취수하는 수용가, 그리고 하천유역내의 지자체와 일반국민이 모두 활용할 수 있는 시스템으로 구축됨으로서 하천의 수량과 수질상황 그리고 용수 수급상황과 각종 해석모형을 통해 생산되는 장·단기 예측 수문·수질정보는 실시간 통합 물 정보 제공시스템을 통해 인터넷으로 제공될 것이다. ●

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

< 참고문헌 >

고익환, 황만하, 맹승진, 박정인, 권기량, "실시간 물관리 운영시스템 개발(I) - 유역유출분석모형 부문", 2002 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2002.11.

고익환, 박명기, 박상근, 김정엽, 박종택, "실시간 물관리 운영시스템 개발(II) - 저수지군 모의운영 모형개발 부문-", 2002 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2002.11.

고익환, 정세웅, "실시간 물관리 운영시스템 개발(III) - 수질예측 모형개발 부문-", 2002 대한토목학회

학술발표회 논문집, 2002.11.

고익환, 김남일, 김상욱, 황만하, "실시간 물관리 운영시스템 개발(IV) - 통합 물정보 제공 시스템 구축 부문-", 2002 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2002.11.

고익환, 정세웅, 박명기, "하천유역 통합물관리 기술 개발동향", 2002 한국수자원학회 기초과제연구보고서, 2002.12.