

이수관리를 위한 저수지 시스템 모의운영 모형 개발

고 익 환(한국수자원공사 수자원시스템연구소 소장)

박 명 기(한국수자원공사 물관리센터 물관리2팀 과장)

김 정 엽(한국수자원공사 수자원시스템연구소 위촉연구원)

제 1 장 서 론

제 2 장 이수목적 저수지 운영기법 연구개발 동향

제1절 저수지 운영 기법 개요

제2절 국내 저수지 운영 기법 연구개발

제3절 국외 저수지 운영 기법 연구개발

제 3 장 저수지 모의운영모형 개발방안

제1절 모형 개발전략

제2절 저수지 시스템 운영률 도출방안

제 4 장 실시간 저수지군 모의운영 모형 개발

제1절 하도추적 효과의 반영

제2절 시스템의 수학적 표현

제3절 모형의 기능 및 구조

제 5 장 적용 및 고찰

제1절 대상유역 댐운영 현황

제2절 모의운영평가

제 6 장 결 론

참 고 문 헌

제 1 장 서 론

지난 40여년 동안 많은 수의 저수지들이 우리나라 전역에 걸쳐 건설되었다. 건설된 저수지들의 운영에 영향을 미치는 지역주민과 공공의 다양한 욕구나 수자원관리의 패러다임의 변화에 부응하여 저수지 운영 전략도 그동안의 수량중심의 단일목적, 개별 저수지운영방식 위주에서 탈피하여 이수 및 치수목적과 함께 환경적인 지속가능성을 적극적으로 반영한 하천유역단위의 저수지군 시스템 운영의 전반적인 효율성을 향상시키려는 방향으로 전환되고 있다.

댐의 기능은 홍수조절과 각종 용수 공급, 수력발전, 내륙주운, 하천 수질 환경생태보존을 위한 적정 하천유량의 유지 등이 주를 이루며, 최근에는 호소와 하천 수변공간 조성을 통한 여가 및 휴식공간으로서의 기능도 강조되고 있다. 더욱이 이미 현실로 닥친 물 부족, 수질오염을 둘러싼 유역 상·하류 지역간의 갈등과 물 분쟁 등으로 우리 정부와 국민이 부담해야 하는 막대한 사회적 비용에도 불구하고 더 필요한 수자원의 구조물적인 추가확보는 갈수록 어려워짐에 따라 이미 확보된 수자원 시설물을 최대한 활용하여 공평성과, 효율성, 환경적 지속가능성을 통합적으로 고려한 보다 합리적인 유역단위의 물 이용, 배분을 위한 비구조물적인 수자원관리 기술향상 노력이 절실한 형편이다 (고익환 등, 2002).

이를 지원하는 수자원관리 기술개발의 일환으로 우리나라에서도 지난 1980년대부터 최적화 기법에 의한 댐 저수지군의 연계운영 모형을 개발하기 위한 연구가 여러 차례 시도되어 왔으나, 아직까지 그 어느 모형도 충분한 validation test와 지속적인 보완 개선과정을 통하여 댐 운영계획 실무의 주 분석도구로 장착되어 활용하고 있지는 못한 실정이다. 그 이유로는 기존의 개발된 모형들에 적용된 최적화 기법 자체가 유역 물관리의 흐름을 지나치게 단순화하게 되므로 최적화 모형만으로 하류 물부족의 발생 등 단기 저수지시스템 운영계획수립상의 변동상황을 적절히 반영하기 어려운 점과 저수지군 운영 최적화 모형의 중요한 상태변수인 댐 상류 유입량 및 하류측 소유역이나 주요 제어지점들의 수문예측 정보를 제공하는 유역유출해석 기반과의 연계가 미흡했다는 점, 또한 최적화모형의 수학적 논리들이 실무 기술자들이 받아들이기에는 너무나 학술적으로 기술되어 보편적인 운영방법으로 자리잡지 못한 점 등을 들 수 있다.

이 연구에서는 이와 같은 유역통합물관리를 실제적으로 지원가능한 기술개발의 필요성과 이미 개발된 최적화운영모형의 적용상의 문제점들을 감안, 기존 댐저수지의 운영차원에서의 기술을 개선하기 위한 시도로서 이수관리목적 저수지 시스템 모의운영모형을 개발하였다. 모형개발과정에서 다목적댐 운영관리 업무절차를 고려한 유역 저수지 시스템 운영의 기본틀을 구성한 모의운영 모델링 기법을 제시함으로써 향후 댐 운영 실무자들이 쉽게 사용 가능한 유역 수자원 관리기술로 정착시키는데 주된 목표를 두었다.

제 2 장 이수목적 저수지 운영기법 연구개발 동향

제1절 저수지 운영 기법 개요

일반적으로 이수관점에서의 저수지 최적 연계운영방안 도출을 위한 연구에는 Linear Programming, Dynamic Programming, Network Flow Optimization, Nonlinear Mathematical Programming 등의 기법들이 다양하게 적용되고 있다(Yeh, 1985; Wurbs, 1994).

Linear Programming(선형계획기법)은 용수공급과 하천유지용수 등을 고려한 선형문제의 해석에 매우 적합하며, 최적화 기법 중 가장 보편화되어 수자원연구자들에게 가장 많이 사용되고 있는 기법이다. 물 관리의 문제가 항상 주어진 조건에 선형적으로 반응하는 경우인 관개용 저수지, 용수공급 목적 댐 운영 등의 문제에는 매우 효과적이거나 수력발전용 댐이나 다목적댐과 같은 발전함수의 선형화에 제약을 받는 경우에는 그 적용능력이 약한 점, 계산기간(stage)이 길어질 경우 입력자료 구성의 어려움, 차원 및 계산기간의 증가에 따른 행렬해석의 한계성 등의 단점이 있다. 현재로서는 Linear Programming을 이용하는데 있어 제약으로 작용하는 것이 비선형 함수의 처리문제라고 할 수 있는데 Mixed Integer Programming(MIP:혼합정수계획법) 기법을 사용하여 각 구간대별로 정수형 변수의 효율적인 처리가 가능 범위 안에서 비선형항을 처리하고 있다.

Dynamic Programming(동적 계획기법)은 저수지 운영과 같은 순차적인 의사결정 문제에 있어 수학적 모형들 중 실제 시스템의 특징을 가장 잘 표현해 줄 수 있다고 알려져 있으며, 댐군 최적 운영을 위한 다양한 해법을 제공해 준다. 그러나 대상 댐의 수가 많아지면 국부 최적해에 빠지기 쉽고 계산시간도 지수적으로 증가하는 문제(Curse of Dimensionality)가 있어 효과적인 해의 도출이 어려워지기도 한다. 반면에 Dynamic Programming기법이 다른 최적화 모형에 비해 유입량에 대한 추계학적인 성질을 반영하기가 간편하다는 점에서 추계학적 주기성을 반영해야하는 월단위 이상의 댐운영계획 수립에는 장점을 가진다.

Network Flow 알고리즘은 용수공급과 하천유지용수만을 고려할 경우 상당히 효과적인 운영방안을 도출해 낼 수 있으나 수력발전을 통한 편익은 그 함수가 비선형관계식이 되므로 매 기간별 운영상태를 표현하는 것은 선형을 전제로 하는 Network모형에서는 고려하기가 쉽지 않다. 최근에는 이러한 Network모형에 Lagrangian Relaxation Algorithm을 도입한 MODSIM(Labadie, 1997)이 개발되어 다수의 연구가 수행 중이나 이는 전체 시간단계에서의 최적해를 제시하지 못하는 문제를 가진다. 그러나 복잡다원화되는 광역 수자원계획 및 운영상

의 평가와 문제해석에 시스템의 구성과 분석기능이 편리하고 유연성을 가진다는 면에서 이 모형의 활용성은 밝으며, 특히 용수배분의 제도적, 법적 구조에 대한 시스템내의 반영능력이 뛰어나 장래 물문제 해결에 유용할 것으로 판단된다.

비선형성을 고려한 Nonlinear Programming 기술의 활용은 매우 정확한 모형을 개발할 수 있으나, 대상문제의 Global Optimal Solution의 도출을 보장하지 못하는 단점을 갖고 있고, 일반적으로 계산량이 많아서 댐의 개소수가 많은 큰 시스템에서는 적용하기가 용이하지 않다.

표 1. 저수지 시스템에 대한 최적화 기법간 장·단점 비교

구 분	장 점	단 점
Linear Programming	<ul style="list-style-type: none"> ○ 해법이 다른 기법에 비해 단순함. ○ 패키지화되어 있어 모형 구성이 용이함. ○ 모형이 구성되었을 경우에는 타기법에 비해 계산시간이 신속함. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 비선형 문제를 순차적으로 Taylor 급수 전개하여 반복계산할 수 있으나 이때는 제약조건의 선형성이 보장되어야함. ○ 제약조건식이 늘어날수록 계산량은 전체 운영시간수만큼 늘어남.
Nonlinear Programming	<ul style="list-style-type: none"> ○ 저수지시스템 운영을 비교적 잘 표시. ○ 매우 정확한 모델 수립 가능. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 시스템의 동적구조를 무시함. ○ 제약조건을 정칙함수로 반영시키는 데 난점이 있음 ○ 대상문제의 Global 최적해 도출을 보장하지 못함.
Mixed Integer Programming	<ul style="list-style-type: none"> ○ LP의 비선형 제약을 Piecewise Linear Approximation 기법을 통해 근사화 ○ 해석할 시스템 차원수가 많은 경우에도 해석가능 ○ 입력자료 처리를 통해 시스템 해석이 가능 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 장기간 목적함수, 제약조건에 적용하는 경우 용량에 제약을 받음 (최근 H/W 발달로 거의 해결) ○ 선형 함수에 대한 제약이 완전히 해결되지는 않았음. (Successive Linear Programming, SLP 병행 필요, 아닌 경우 정수형 변수 처리를 위한 비효율성 발생) ○ 입력파일 작성에 많은 경험 요구 (사용자의 시스템 정식화 능력이 중요한 역할)
Dynamic Programming	<ul style="list-style-type: none"> ○ 다단계 분석을 위한 동적 특성에 이론적으로 가장 적합 ○ 추계학적 유입량 계열을 반영하기가 용이(월단위이상 분석에 용이) 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 이산화에 따른 계산용량 및 계산시간이 지수적으로 팽창됨.
Network Flow Programming	<ul style="list-style-type: none"> ○ 용수공급과 하천유지용수만을 고려할 경우 아주 효과적임 	<ul style="list-style-type: none"> ○ 선형을 전제로 하는 Network 모형에서는 수력발전을 통한 이익은 함수가 비선형이므로 표현이 어려움.

제2절 국내 저수지 운영 기법 연구개발

우리나라에서 시스템 분석기법에 의한 저수지 운영계획모형이 제시된 것은 지난 '80년대부터라고 할 수 있다. 권오현(1984)은 국내 최초로 제어이론에 의한 한강수계내 다목적댐 및 수력댐을 연계한 최적운영방안을 제시하였다. 이후 '90년대 초반부터 저수지 운영계획 수립을 위한 모형개발에 관한 연구가 본격적으로 추진되어 이산형 미분동적계획기법(DDDP)에 근거한 이순탁 등(1993)의 낙동강수계의 4개 다목적댐 저수지 연계운영 모형개발, 한국수자원공사 수자원연구소의 CSUDP에 근거한 한강수계 저수지시스템 운영 의사결정지원시스템 개발에 관한 연구(고석구 등, 1993) 등이 시도되었다. 그러나 이러한 연구들은 최적화모형 안에서 유역내의 물수급상황 및 강우-유출모형과의 연계부분에서 그 방안을 제시하지 못했으며, 당시 댐관리상황에서 하류의 유출수문 및 물이용 현황을 실제적으로 고려하지 못한 한계로 인해 실용화를 거두지 못하였다. 이후 한국수자원공사와 이길성 등(1996)에 의한 낙동강수계 실시간 최적 저수관리시스템 개발에 관한 연구가 수행되었다. 이 연구는 댐운영계획의 의사결정과정에서 이전의 연구와는 다르게 최적운영기법 개발이 아닌 대상 유역의 수량과 수질관리를 위한 요소기술들을 정착시키는 데 그 목표를 두었다. 이 과정에서 도출된 SSARR모형에 의한 소유역 및 지류유입량 산정으로부터 댐 운영 실무자의 운영률을 도입한 저수지 운영모형이 이들과 연계한 수질모형과 결합된 시스템이 구축되었다. 그러나 이 시스템도 지속적인 검보정 및 보완 등의 후속 연구개발 노력의 미흡으로 실용화를 시키지 못한 바 있다. 이후 한국수자원공사와 김승권 등(1997)에 의하여 혼합정수계획기법(MIP)에 근거한 한강수계 최적 연계운영 모형(H-CoMOM)모형이 개발되어 이후 4년여의 수정 및 시험운영단계를 거쳐 2001년부터 한강수계 저수지군 운영계획 수립용 도구로 제한적으로 댐운영실무에 적용되고 있으나 유입량 처리의 불확실성을 고려하기 위한 방법론이 아직 제시되지 못한 상태에서 유입량의 추계학적인 처리능력을 고려한 기법의 개선이 필요한 실정이다. 2001년에 낙동강수계를 대상으로 개발된 표본추계학적 동적계획기법(Sampling Stochastic Dynamic Programming)은 이러한 문제점의 보완을 고려한 것으로 현재는 시험운영 단계에 있다.

우리나라의 평·갈수기 다목적 저수지운영은 용수공급의 안정성 확보에 비중을 둔 보수적인 댐운영계획 수립을 기반으로 하며, 현재 수자원실무자들이 정상조건과 갈수기 가뭄에 대비하여 적용중인 댐운영 방법을 이 절에 정리하였다.

(1) 정상조건에의 댐운영

현재 한국수자원공사에서 적용되고 있는 댐운영 업무 처리흐름은 그림 1과 같다.

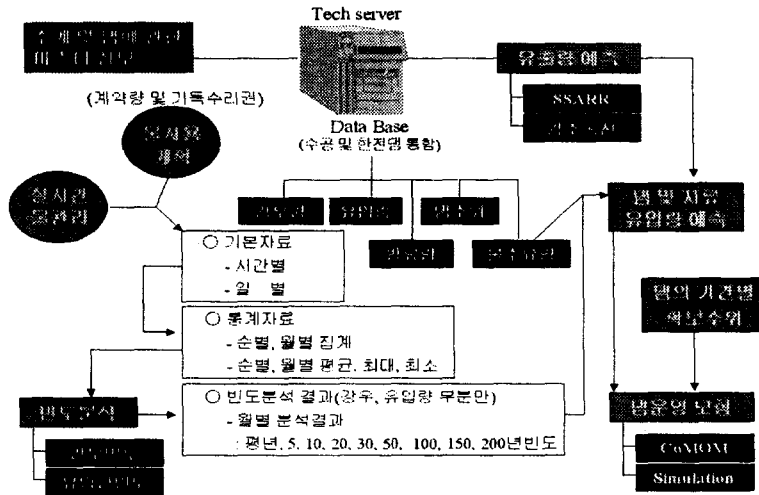


그림 1. 다목적댐 관리를 위한 흐름도

지난 20여년간의 댐운영 경험을 토대로 정리된 다목적댐 운영을 위한 실무적용 기법으로 '댐운영 기준수위'의 설정을 들 수 있다. 이 '댐운영 기준수위'는 평·갈수기와 홍수기별로 개발·적용되는 데, 이중 평·갈수기 댐운영 기준수위는 대상 시기에 어느 정도의 수량을 다목적댐에서 저류하고 있어야 하는지를 결정해주는 지표로서 이수안전도에 입각하여 댐의 용수 공급계획을 보장할 수 있도록 설정된다. 그림 2에 금강유역 대청다목적댐의 기준수위의 개발·적용 사례를 제시하였다.

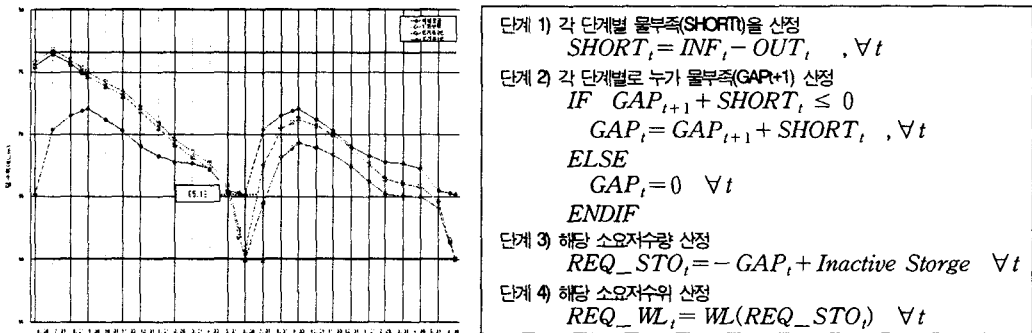


그림 2. 평·갈수기 댐운영 기준수위 및 산정방법(대청댐)

(2) 가뭄대비 댐운영기법

다목적댐 운영 기준수위는 정상적인 상황에서의 댐운영 기준수위로서 수문상황이 악화되는 가뭄에 대비하기 위해서는 저수상황에 따른 공급량 감소를 시작하는 저수지 운영의 기준(trigger volume)과 각 위험 단계별 감량공급기준이 필요하게 된다. 현재 다목적댐 관리의 감량기준은 “댐관리규정(2001. 9)”에 언급되어 있는 우선순위에 따라 그림 3과 같이 적용하고 있다.



제 6 직용도별 용수공급순위

① 댐은 이용목적에 따라 홍수조절과 생활용수·공업용수·하천유지용수·발전용수공급 등의 용도로 이용하는 것으로 한다. 다만, 공익 및 댐의 효율 증진 등을 위하여 필요한 경우에는 댐 사용권을 침해하지 아니하는 범위내에서 기타 용도로 이용할 수 있다.
 ② 제1항의 규정에 의한 댐의 용도별 우선순위는 다음 각호와 같다. 1. 홍수기에는 홍수조절이 타 용도에 우선한다. 2. 이상갈수시에는 댐의 저수율 생활용수·공업용수·농업용수·하천유지용수·발전용수의 순으로 공급함을 원칙으로 한다.(이하생략)

그림 3. 다목적댐의 용도별 우선순위

공급단계별 댐운영 기준수위는 20년빈도 갈수조건에 대하여 그림 4와 같이 개발·적용하며, 댐의 수위상황별로 해당시기에 댐이 공급할 수 있는 수량을 결정할 수 있도록 제공하고 있다.

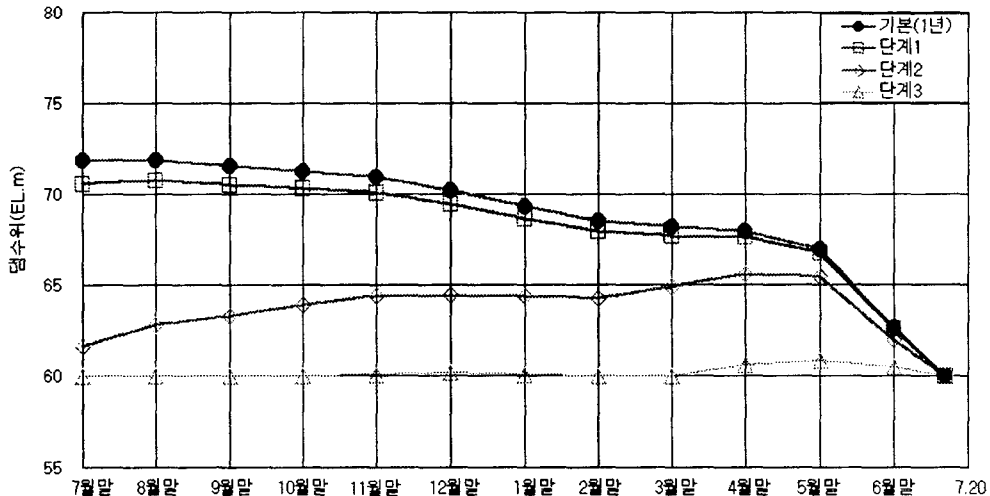


그림 4. 대청댐의 공급단계별 갈수대응 수위

표 2. 평·갈수기 주요 운영기준 및 고려사항

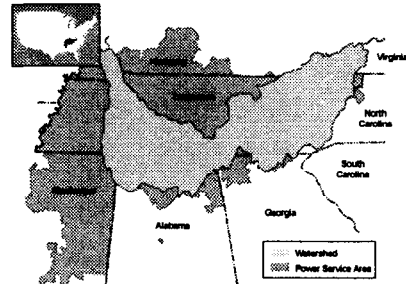
- 현재 수문기상 및 유입량 상황 고려 추가유입량 예측(장단기 기상전망 고려)
- 예측된 추가유입량과 현저수량 기준 용수공급능력 검토(월 또는 순별 분석)
- 월별 기본계획공급량에 가급적 충족하도록 운영(하류 상황을 고려 탄력적 증감)
- 이수안전도 고려 댐별로 정한 월별 확보저수위 고려
- 하류 유황 및 수질사고를 고려한 탄력적 운영(수질악화 및 취수장애 긴급대처)
- 댐 상·하류 제약조건 고려 (발전설비 교체 및 수리, 하천공사, 상류주운 등)

제3절 국외 저수지 운영 기법 연구개발

국의 연구동향 검토에서는 미국의 대표적인 물관리기관인 TVA(Tennessee Valley Authority), BPA(Bonneville Power Administration), DWR(Department of Water Resources of California State)에서의 저수지운영 기법을 조사하여 정리하였다.

(1) TVA(Tennessee Valley Authority)

현재 적용중인 댐저수지 운영모형은 TVA가 미개척 국, 콜로라도주립대 CADSWES와 공동으로 개발한 RiverWare (Zagona 등, 2001)로서 1996년이후 모의모형부분(Pure Simulation 및 Rule-based Simulation Models)을 먼저 개발하여 검증·보완해 가면서 최적운영모형



부분(Pre-emptive Linear Goal Programming)을 추가 개발하여 2000년 6월부터 물관리 시스템에 장착하여 실무에 적용 중에 있다. 모형적용을 위한 기간별 댐수위의 기준치로서 우리나라의 다목적댐 운영의 기준수위와 유사한 방식을 적용 중에 있으며, TVA의 운영팀에서 유출모형으로 산정된 댐유입량자료로 부터 RiverWare를 6시간마다 수행하여 운영계획을 수립하고 있다. 그림 5는 RiverWare모형 수행을 위한 작업단계를 나타내며, 이들이 적용중인 댐운영 기준수위의 예를 그림 6에 도시하였다.

TVA의 저수지운영계획 분석기간은 14일 동안을 대상으로 하며 기본적인 발전기 운영(Hydropower Scheduling)에 대한 사항이 6시간 간격으로 결정되어지는데 이는 RiverWare를 수행하는 시스템에서의 해석시간에 의해 결정된다. RiverWare의 수행은 2단계로 이루어지는데, 먼저 최적화 운영 모델링으로 1차적인 방류계획 및 댐의 저류량 등 운영상황이 결정된 뒤 모의운영모형을 적용하여 운영계획이 결정되어진다. 이때 모의운영 모델링을 하는 이유는 사

용하는 최적화 기법이 LP계열 모형이므로 선형화 단계에서 파생되는 오차항을 제거한다는 이
 유가 가장 크며, 또한 이러한 과정을 걸치면서 댐 운영실무자가 손쉽게 모형에 접근할 수 있
 는 여지를 만들고 있다고 판단된다. 이러한 6시간 간격의 운영계획은 이수목적 운영단계에서
 의 의사결정을 위해 적용되며, 홍수기 하류 수위 및 유량에 대한 세부적인 정밀검토가 필요할
 경우에는 1시간 간격으로 동적인 하도 추적모형을 수행하여 별도로 적용하고 있다.

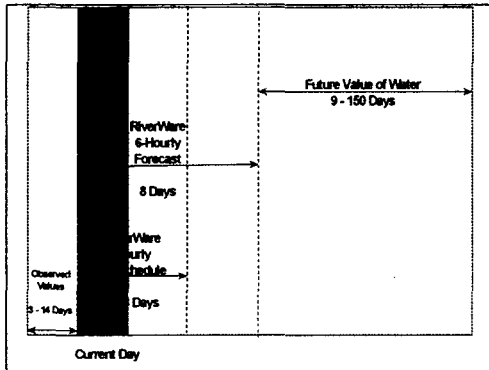


그림 5. RiverWare모형의 수행단계

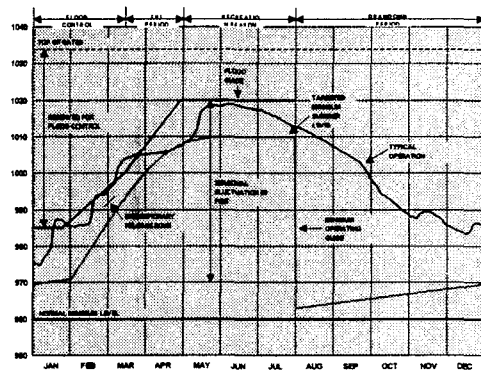


그림 6. TVA댐관리를 위한 기준수위

(2) BPA(Bonneville Power Administration)

미 상무성산하 전력청인 BPA는 수력을 주축으로 하여 미국 북서부의 전력 생산, 공급을 관
 장하는 공공기관이다. BPA는 유출모형으로 NWS-RFS를 사용하고 있으며 장기유출예측을 위
 해서 ESP(Ensemble Streamflow Prediction)기법을 적용하고 있다. 수력발전 운영계획수립을
 위해서 그 동안 모의운영모형(HYDROSIM)만을 사용하여 왔으나, 미국내 발전시장에 적극적
 으로 대응하고 운영효율을 증대시키기 위하여 최적화 운영모형(Columbia Vista)을 개발하였
 으며, 현재 시험적용 초기 단계에 와있다.

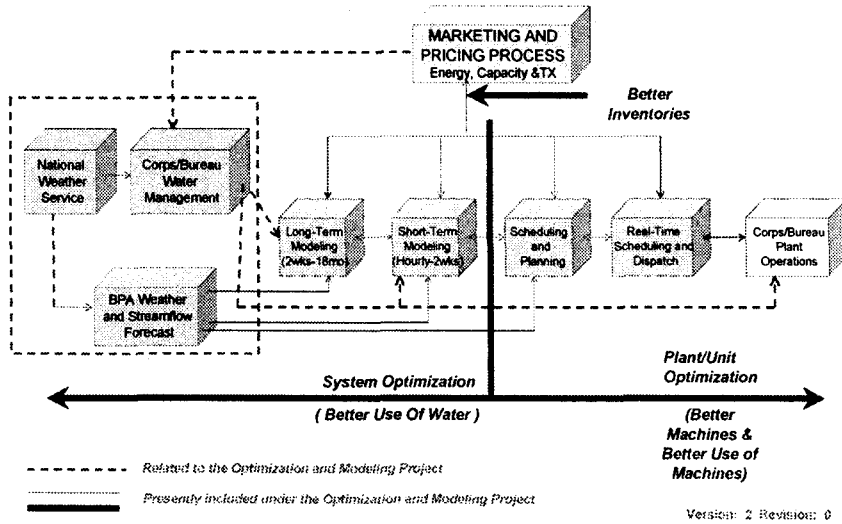
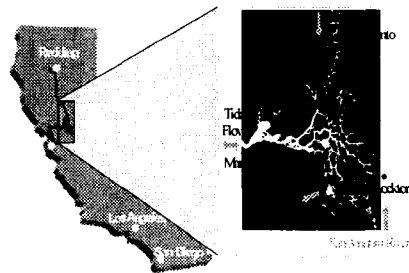


그림 7. Columbia Vista의 기본구조(BPA)

(3) DWR(California Department of Water Resources)

미 캘리포니아 주정부 수자원국(DWR)에서는 풍부한 북부지역의 물을 수로를 통하여 수자원이 부족한 중남부지역으로 공급하는 물 배분을 정책을 채택하고 있다. 현재 캘리포니아주는 매 기간별 물 수요량을 파악하여 spreadsheet모형을 통하여 10년 빈도 갈수조건을 기준으로 댐운영계획을 수립하고 있으며, 미 개척국과 함께 개발한 CALSIM II



Network Simulation 모형으로 월단위 용수수요와 공급의 물수지를 모의하여 지역간 물배분 문제를 해석에 사용하고 있으며 주된 적용분야는 다음과 같다.

- 현재와 미래 물수요 조건에서 용수공급가능량과 공급의 신뢰도 평가
- 여러 가지 수자원사업 운영 정책 대안에 대한 물공급의 평가
- 기존과 미래 환경규제 법규가 수자원공급에 미치는 영향평가
- 캘리포니아주 수자원장기종합계획(CWP)의 갱신

제 3 장 저수지 모의운영 모형 개발방안

제1절 모형 개발전략

2장에서 기술된 것처럼 그동안 이수목적 저수지운영 계획수립을 지원하기 위한 다수의 모형개발이 국내외에서 시도되어 왔으나 우리나라에서는 아직까지 이러한 연구성과들을 유역물관리 의사결정에 적용가능한 실용화 단계에 도달하지 못한 실정이다. 따라서 본 연구를 통한 이수목적 유역 저수지 시스템 모의운영모형 개발에서는 지금까지의 관련 연구개발상의 시행착오를 교훈 삼아 모델링팀과 사용자그룹간의 밀접한 협력체계를 구축, 다음의 개발전략을 토대로 추진 중에 있다.

- ① 모형개발의 초기 및 개발과정 중에 필요한 입력자료를 최대한 확보한다.
- ② 최적화 모형이 복잡한 유역 물관리 운영여건을 지나치게 단순화하는 문제를 극복하기 위하여 이와 연계해서 혹은 독자적으로 자세한 분석 평가가 가능한 모의운영모형을 현 단계에서 개발해 나가되,
- ③ 개발팀은 사용자가 필요로 하는 복잡한 유역 물관리상의 다양한 제약조건들을 모형에 최대한 반영시키도록 하며, 궁극적으로는 댐운영 실무자들의 풍부한 경험을 바탕으로 한 대상 유역 고유의 저수지군 시스템 운영률을 도출해 나간다.
- ④ 개발되는 모형은 댐운영자가 손쉽게 사용할 수 있도록 사용지침서로 문건화(documentation) 한다.
- ⑤ 개발팀은 사용자그룹과 공동으로 개발단계에서의 검·보정 이후에도 대상유역에의 실제 적용을 통한 validation test 와 model upgrade, 사용자그룹의 모델사용 능력 직무교육 훈련 및 분석지원을 일관성을 갖고 지속적으로 추진하여 모형의 완성도를 높여 나가야 한다.

제2절 저수지 시스템 운영률 도출방안

수자원시스템에서 저수지시스템간, 운영목적들 사이, 운영시간대별 기간들 사이에 저류량과 방류량에 관한 배분을 위한 의사결정이 필요하다. 저류수의 방류에 관한 모의운영률은 일반적으로 많이 적용되는 표준운영방안(SOP)를 비롯하여 space rule과 hedging rule, 그리고 packing rule로서 제시되어왔다 (Bower 등, 1962). 이중 동일한 목적의 병렬 저수지군의 경우에 저수지들 사이의 필요한 방류량을 배분하는 운영률을 space rule이라 하며, 저수지 운영 중에 보다 심각한 용수나 수력발전에너지의 부족 가능성을 줄이기 위하여 보다 작은 현재의 부족을 감수하는 운영방식이 hedging rule이다.

대부분의 저수지운영 계획수립에 적용되고 있는 개념은 표준운영방안(Standard Operating Policy, SOP) 수준이나 이러한 운영은 가용 수자원이 있는 경우에는 항상 목표 공급량만을 공급하고 부득이한 경우는 감량공급을 하는 것으로 되어있다.

그러나 현실적으로 가뭄기간 또는 가뭄이 예상되는 시기에는 이후에 도래할 수 있는 더 큰 물부족 조건에 대비하기 위하여 가용 수자원의 일부를 확보하는 것이 필요하며, 이러한 운영 상황에서는 표준운영방안(SOP)을 적용하는 경우에 짧지만 극심한 또는 장기간 지속되는 물부족이 발생할 수 있다. 이러한 부적절한 운영상황을 방지하기 위해서는 가용 수자원의 일부를 확보하도록 하는 hedging의 개념 도입이 운영모형에서 필요하게 된다.

기존의 시스템 최적화 방식에 의한 연구들에서는 이러한 가뭄의 event상황에 대한 고려에 충실하지 못하였다. 정상적인 수문상황에서의 최적운영방식은 가뭄이 예상되거나 도래한 event상황에서의 운영방식과는 차이가 생기므로 hedging에 의한 저수지 관리는 다목적댐 저수지 운영에 있어서 큰 의미를 가진다.

이러한 hedging과 대별되는 다른 개념으로의 packing은 발전사용수량을 초과하는 무효방류가 예상되는 경우 이를 사전에 발전사용수량의 허용치 이내에서 방류를 수행할 수 있도록 하는 운영방안이다. 그러나 유입량의 예측이 완벽할 수는 없기에 신중한 적용이 요구된다.

본 연구에서는 전술한 hedging에 의한 댐운영의 수행성 검토를 Bayazit 등(1990)에 의한 모의운영기법을 기본으로 하여 적용하였으며 2차발전생산의 효율성을 높이기 위하여 packing에 대한 소극적 적용방안을 모색하였다.

(1) 표준운영방안(standard operating rule)

표준운영방안(standard operating rule)은 아래와 같이 표현된다.

$$R_t = S_{eff\ t-1} + I_t \quad \text{if } S_{eff\ t-1} + I_t \leq D_t \quad (1)$$

$$R_t = D_t \quad \text{if } D_t \leq S_{eff\ t-1} + I_t \leq S_{max\ eff\ t} \quad (2)$$

$$R_t = S_{eff\ t-1} + I_t - S_{max\ eff\ t} \quad \text{if } S_{eff\ t-1} + I_t - D_t > S_{max\ eff\ t} \quad (3)$$

- 여기서, R_t : t월중 저수지 공급량(취수 및 방류량)
 $S_{eff\ t}$: t월중 저수지 저수량(유효저수량 개념)
 I_t : t월중 저수지 유입량
 D_t : t월중 저수지 수요량
 $S_{max\ eff\ t}$: t월중 저수지 저수량 상한선(유효저수량 개념)

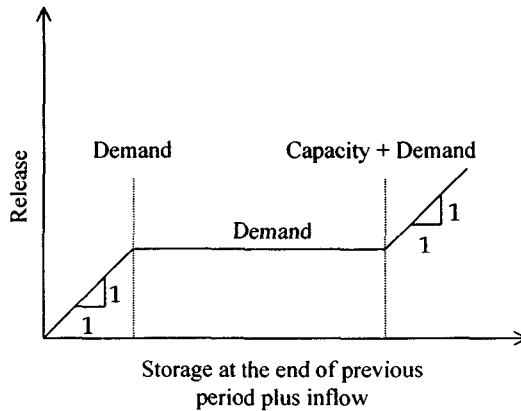


그림 8. 표준운영방안의 S-shaped Curve(1994, Shih)

(2) hedging rule 및 packing rule

경제적으로 판단할 경우에 hedging rule은 물사용의 손실함수에 대한 조건이 비선형함수 일 때 바람직하다. 만일 특수한 용도로서 물에 대한 한계가치(marginal value)가 일정한 경우에는 물부족에 따른 경제적인 손실함수는 선형함수가 되어, 추계학적 유입량 계열을 고려하는 경우에 물부족은 이후의 극심한 부족을 감수하더라도 가능한 뒤로 미루어지게 된다.

유입량 예측이 비교적 양호한 경우에 사용되는 방식으로 packing rule이 있다. packing rule은 유입량 예측결과에서 추가적인 계획 방류가 없을 경우에 수문 방류량을 통하여 불필요하게 방류량이 발생하는 것을 방지하기 위해 저수지 공간을 남겨두는 데에 목적을 둔 운영틀이다.

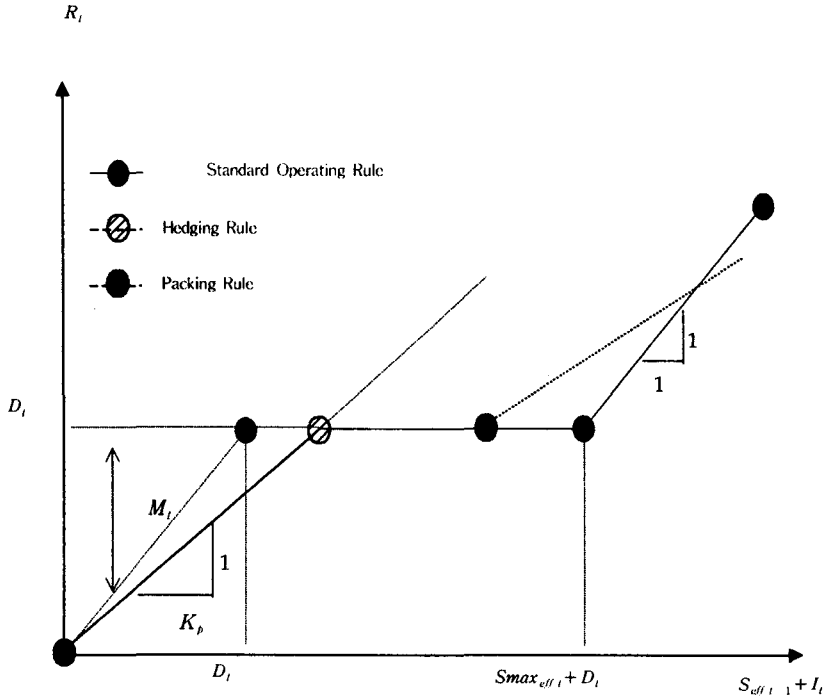


그림 9. hedging rule 및 packing rule

위에서 살펴본 hedging rule 및 packing rule을 다음 식과 같이 정식화하였다.

$$STOMX_{i,t} = (SMAX_{i,t} - SMIN_i) \quad \forall i, \forall t \quad (4)$$

$$EFFSTO_{i,t} = (S_{i,t} - SMIN_i) \quad \forall i, \forall t \quad (5)$$

$$ALLOWA_{i,t} = (EFFSTO_{i,t} + Y_{i,t} - DR_{i,t}) \quad \forall i, \forall t \quad (6)$$

$$SUMSUP = \sum_{i=1}^n (TARGR_{i,t}) \quad \forall t \quad (7)$$

$$SUMEFF = \sum_{i=1}^n (EFFSTO_{i,t}) \quad \forall t \quad (8)$$

$$SUMALB = \sum_{i=1}^n (ALLOWA_{i,t}) \quad \forall t \quad (9)$$

$$DNOUT2 = RMIN_{i,t} \quad \forall i, \forall t \quad (10)$$

$$DNOUT1 = TARGR_{i,t} \quad \text{if } DNOUT1 < 0 \quad \forall i, \forall t \quad (11)$$

$$DNOUT1 = RMAX_i \quad \text{if } DNOUT1 > RMAX_i \quad \forall i, \forall t \quad (12)$$

$$DNOUT1 = (ALLOWA_{i,t} / SUMALB) \times SUMSUP \quad \text{if else} \quad \forall i, \forall t \quad (13)$$

$$TOT1 = DNOUT1 + DR_{i,t} \quad \forall i, \forall t \quad (14)$$

$$TOT2 = DNOUT2 + DR_{i,t} \quad \forall i, \forall t \quad (15)$$

$$DR_{i,t} = DR_{i,t} \quad \forall i, \forall t \quad (16)$$

$$HGSTO_{i,t} = (C_{1,i,t} \times STOMX_{i,t}) + TOT1 \quad \forall i, \forall t \quad (17)$$

$$PKSTO_{i,t} = [(1 - C_{2,i,t}) \times STOMX_{i,t}] + TOT1 \quad \forall i, \forall t \quad (18)$$

$$SMIN_i \leq S_{i,t} \leq SMAX_{i,t} \quad \forall i, \forall t \quad (19)$$

여기서,

$SMAX$: 최대저류량

$SMIN$: 최소저류량

$DNOUT1$: 댐 하류 목표방류량

$DNOUT2$: 댐 하류 최소방류량

DR : 댐내 취수량

$TOT1$: 댐 목표방류량

$TOT2$: 댐 최소방류량

$STOMX$: 이수용량

$EFFSTO$: 유효저수량

$ALLOWA$: 댐 하류 최대가능방류량

(3) 직렬 저수지군의 운영률

Lund(1999)에 의해 정리된 직렬 저수지군의 운영률은 용수공급, 홍수조절, 수력발전에 대해서 그림 10과 같다.

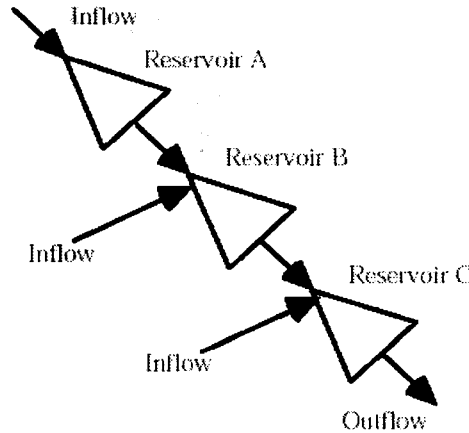


그림 10. 직렬 체계 저수지 시스템

표 3. 직렬체계 저수지군에 대한 개념적 운영률

목 적	계 절 / 기 간	
	수위 복원기(Refill)	수위 저하기(Drawdown)
용수 공급	먼저 상류 저수지 채움	먼저 하류 저수위 비움
홍수 조절	먼저 상류 저수지 채움	먼저 하류 저수위 비움
에너지 용량	먼저 상류 저수지 채움	먼저 하류 저수위 비움
수력 발전	가장 큰 에너지 생산을 가지는 저수지 용량 최대화	
레크레이션	저수지들 사이의 부가적 용량의 이용으로 최저 레크레이션 균등화함	

(4) 병렬 저수지군의 운영률

그림 11과 같이 병렬로 연결된 저수지들의 운영은 하류부의 저수지들이 상류부의 유수를 사용하지 못한다는 점에서 다르다. 다음 표 4에 병렬체계 저수지의 운영률에 대한 개념을 간단히 정리하였다.

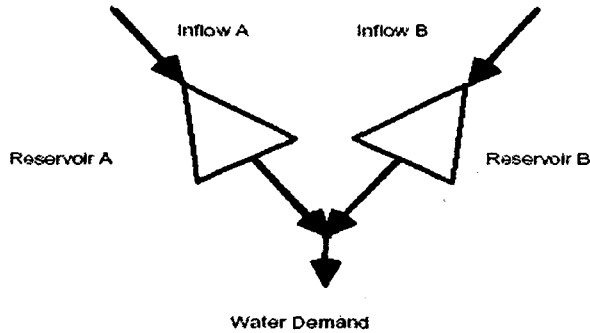


그림 11. 병렬체계 저수지군의 모식도

표 4. 병렬체계 저수지군에 대한 개념적 운영률

목 적	계절/기간	
	수위 복원기(refill)	수위 저하기(drawdown)
용수 공급	저수지간 수문방류 가능성을 균등화함	저수지간 저류수 배제확률을 균등화함
홍수 조절	홍수에 대비해 보다 저류공간을 확보	-
에너지 용량	energy spill의 계절별 기대치를 저수지간에 균등화 시킴	마지막 단계에서 복원기 energy spill의 기대치를 저수지간에 균등화 시킴
수질	저수지간 한계 계절별 수질방류(marginal seasonal water quality spill)의 기대치를 균등화	마지막 단계에서 저수지간의 복원기 수질방류 기대치를 균등화
수력 발전	가장 큰 발전량을 가짐과 동시에 저수량을 최대화	
레크레이션	저수지간 추가 용량에 따른 한계 여가능력 향상을 균일화	

(5) 물부족 평가지수

다목적댐저수지의 기능은 각종 용수 공급과 홍수조절, 하천수질 환경보존을 위한 유량 유지, 수력발전 등으로 정의할 수 있다. 이중 홍수조절을 제외한 저수지의 가장 큰 기능은 적정 목표 방류량을 충족시키기 위한 것으로 용수공급의 충족여부를 세분화한 기준으로 제시한 것이 Hashimoto 등(1982)의 연구였다. 즉, Hashimoto 등은 저수지 물공급의 적절성에 대한 평가를 물부족에 대한 빈도(frequency), 지속기간(duration), 심각도(severity of failure)를 토대로 한 신뢰도(reliability), 복원도(resilience), 부족심도(vulnerability)로 제시하였다.

본 연구에서는 hedging rule이 모형에서 적정하게 거동하는지를 판단하고자 Hashimoto 등이 제시한 3가지의 지표를 개발된 모형을 수행하면서 검토하도록 프로그램을 개발하였다. 물 부족을 평가하기 위해 적용된 신뢰도, 복원도, 부족심도에 대한 개념을 정리하면 아래와 같다.

가. 신뢰도(reliability)

신뢰도란 “그 시스템의 상태가 만족스러운 경우의 빈도 또는 확률(α)”로 정의된다. 여기서, 이산화된 시간축 t 에 따른 무작위 변수 Φ_t 에 의한 시스템의 출력을 생각할 때, 일반적으로 가능한 Φ_t 는 만족스러운 결과집합(satisfactory set, SS)과 불만족스러운 결과집합(unsatisfactory set of failure set, FS)으로 분리될 수 있다. 식은 다음과 같다.

$$\alpha = Prob\{\Phi_t \in SS\} \tag{20}$$

나. 복원도(resilience)

복원도란 어떤 시스템이 한번 실패한 후에 다시 정상상태로 얼마나 빨리 회복되어지는 가를 나타내는 기준으로 만일 실패가 지속되어 시스템의 회복이 느려진다면 이는 신중히 고려해야 할 필요가 있다.

$$\gamma = \frac{\rho}{1 - \alpha} = \frac{Prob\{\Phi_t \in FS, \Phi_{t+1} \in SS\}}{Prob\{\Phi_t \in FS\}} = Prob\{\Phi_{t+1} \in SS | \Phi_t \in FS\} \tag{21}$$

다. 부족심도(vulnerability)

부족심도란 불만족상황(FS)의 심각성 정도를 나타내는 기준이다. 시스템의 효율성과 신뢰도를 최대화하기 위해서는 시스템의 부족심도는 증가하는데 이는 시스템 설계 및 운영시에 매우 중요한 지표이다. Hashimoto 등은 부족심도에 대한 수학적 정의를 다음과 같이 표현한 바 있다.

부족심도의 수학적 표현을 위해서 수행성 평가변수인 Φ_t 를 ϕ_1, \dots, ϕ_n 으로 이산화할 수 있다고 가정하면, 이 때 ϕ_j 의 불만족상황에 대한 심각도를 표현하는 h_j 라는 변수를 도입하고 이 때의 각 h_j 에 대한 발생확률을 e_j 라고 하면 부족심도는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\nu = \sum_{j \in FS} h_j \cdot e_j \tag{22}$$

제 4 장 실시간 저수지군 모의운영 모형 개발

제1절 하도추적 효과의 반영

개발되는 저수지 시스템 모의운영 모형은 장 단기운영 모두를 고려하는 모형이다. 장기운영 모형은 순별 또는 월별 모형으로서 수계내 상류 주요지점에서의 유량이 동일한 운영시간 안에 대상 수계 하류 출구를 통과할 수 있다고 가정할 수 있지만 단기운영(일별운영)일 경우 상류 주요지점의 유량이 하류 주요 지점을 완전히 통과할 수 없는 문제가 발생하므로 이를 모형 내에서 고려하고자 하도추적 효과를 반영할 수 있도록 모형을 개발하였다.

일반적으로 하도추적은 그림 12와 같이 A 소유역의 유출량이 A점의 하도 상류단에 수문곡선과 같이 유량이 유입되면 지체시간 및 수문곡선의 감쇠효과를 반영하여 B점인 하도 하류단에서의 수문곡선은 어떻게 되는가에 대한 문제로서 이를 고려하기 위하여 모형에서 적용한 하도추적 개념은 그림 13과 같다. 즉, 어떤 하도 A의 상류단에 그림 13.(a)와 같이 유입량이 시간 $t-3$ 에서 시간 t 까지 수문곡선이 유입되면 하류단에서의 수문곡선은 그림 13.(b)와 같이 작성될 것이다.

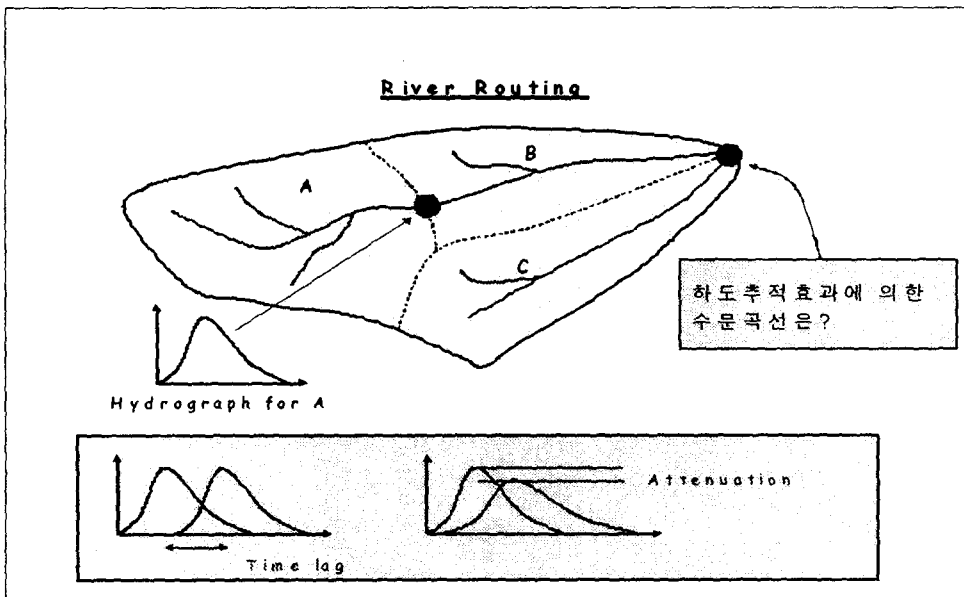
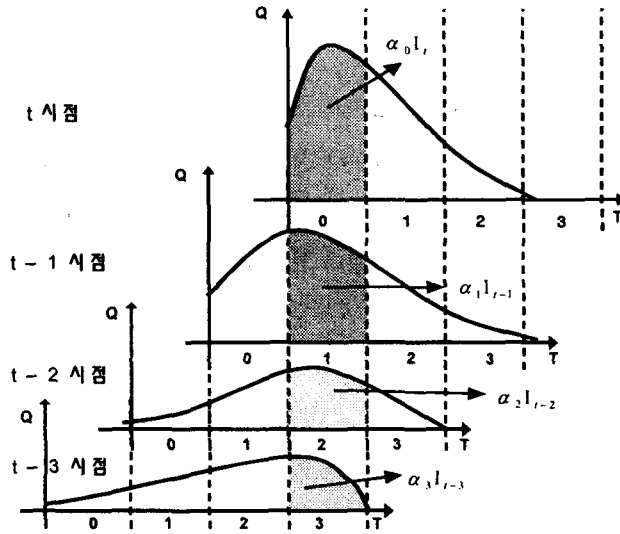
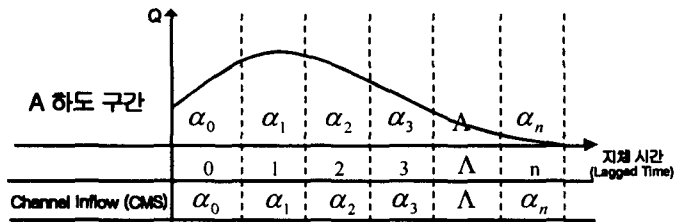


그림 12. 하도추적에 대한 문제



(a) A하도 상류단의 시간별 유입수문곡선 도시



(b) A하도 하류단의 하도추적계수에 의한 시간별 수문곡선 도시

그림 13. 모형에서 적용한 하도추적의 개념

이러한 하도추적개념을 모형에서는 Direct Coefficient Method로 식 (23)과 같이 적용하였다.

$$O_t = \alpha_0 I_t + \alpha_1 I_{t-1} + \alpha_2 I_{t-2} + \alpha_3 I_{t-3} + \dots + \alpha_n I_{t-n} \quad (23)$$

여기서, O : 하도 하류단의 유출량

I : 하도 상류단의 유입량

α : 하도추적계수

t : 일별운영시 계산시점의 일

제2절 시스템의 수학적 표현

시스템의 거동을 분석하기 위해서는 소유역과 하도, 그리고 저수지의 연속방정식 및 제약사항을 수학적 관계식으로 표현해주어야 한다. 본 모형은 경우로부터 유출량을 계산하지는 않는다. 각 소유역별 유출량은 경우-유출모형으로부터 생성된 값인 자연유량이 입력될 경우에 각 소유역의 용수 수요량과 회귀상수에 대한 관계식으로 구성되며 이를 나타내면 식 (24)와 같다.

$$U_{ij} = NF_{ij} - [(1 - a_1) \times DM_{ij} + (1 - a_2) \times DR_{ij}] \quad (24)$$

각 소유역별 유출량은 하도를 통해서 전달되며 이러한 관계는 식 (25), (26)으로 나타낼 수 있다.

$$QIN_{tc} = QOUT_{t,c-1} + \sum_{i=1}^m U_{ti} + \sum_{j=1}^m DF_{tj} \quad (25)$$

$$QOUT_{tc} = C_1 QIN_{tc} + C_2 QIN_{t-1,c} + \dots + C_N QIN_{t-N+1,c} \quad (26)$$

또한, 저수지 조작에서 지켜져야 할 함수식으로 먼저 시스템 방정식인 식 (27)이 있다. 이 저류방정식 (또는 연속방정식)은 저수지의 시간에 대한 동적 응답을 나타내는 것이다. 그리고, 필요한 제약조건으로는 저류용량의 상한과 하한에 따른 제약을 나타내는 식 (28), 방류량의 상한과 하한에 대한 제약을 나타내는 식 (29)이 있다.

$$S_{t+1}^k = S_t^k + I_t^k - R_t^k - DIV_t^k - L_t^k \quad \forall t=1,2,\dots,T \quad (27)$$

$$0 \leq S_{\min}^k \leq S_{t+1}^k \leq S_{\max}^k \quad \forall t=1,2,\dots,T \quad (28)$$

$$0 \leq R_{\min}^k \leq R_t^k \leq R_{\max}^k \quad \forall t=1,2,\dots,T \quad (29)$$

- 여기서,
- U_{ij} : j소유역의 t기간중 소유역 유출량
 - NF_{ij} : j소유역의 t기간중의 자연유량
 - DM_{ij}, DR_{ij} : j소유역의 t기간중의 생공용수 수요량 및 관개용수 수요량
 - QIN_{ic} : c하도의 t기간중의 유입량
 - $QOUT_{ic}$: c하도의 t기간중의 유출량
 - DF_{ij} : c하도로 회귀되는 상류 l하도로부터의 취수된 회귀수량
 - DIV_k^t : k저수지의 t기간중의 취수량
 - L_k^t : k저수지의 t기간중의 손실량
 - S_{min}^k : k저수지의 저수용량 하한
 - $S_{max, i, j}^k$: k저수지의 t기간중의 저수용량 상한
 - R_{min}^k, R_{max}^k : k저수지의 t기간중의 방류 하한 및 상한
 - I_k^t : k저수지의 t기간중의 유입량(= k저수지의 직상류 하도 유출량)
 - α_1, α_2 : j소유역의 생공용수 회귀율 및 관개용수 회귀율

제3절 모형의 기능 및 구조

개발되는 모형으로 단위기간별(일, 순, 월) 이수운영 모의가 가능하며, 일별 모의운영 수행 시에는 하도추적 효과를 반영할 수 있고, 일별이상의 수요량 변동에 따른 저수지군 모의운영도 가능하다. 또한 하나의 댐에 수력발전시설이 복합적으로 구성된 시스템에 대해서도 원활하게 모의가능하며, 같은 유역의 동일 기간에 대해서 타모형(최적화 모형)의 운영 결과를 연계시켜 저수지 운영에 따른 유역내 상황을 모의할 수 있다.

모형은 Fortran 언어로 개발되었으며 크게 4개의 모듈로 구성되었다. 4개 모듈은 프로그램 변수 지정 및 자료입력 모듈, 유량산정 모듈, 발전량 계산 모듈, 출력 모듈이며 이는 총 25개의 서브루틴으로 구성되었다. 운영 선택사항 및 유입량 등의 입력자료를 구성하는 입력파일은 7개 파일이 있으며, 출력 파일은 저수지수와 수계에 따른 가변적으로 출력되므로 처리하였다. 본 모형의 수행단계를 모식화한 전체 프로그램 흐름도는 그림 14와 같다.

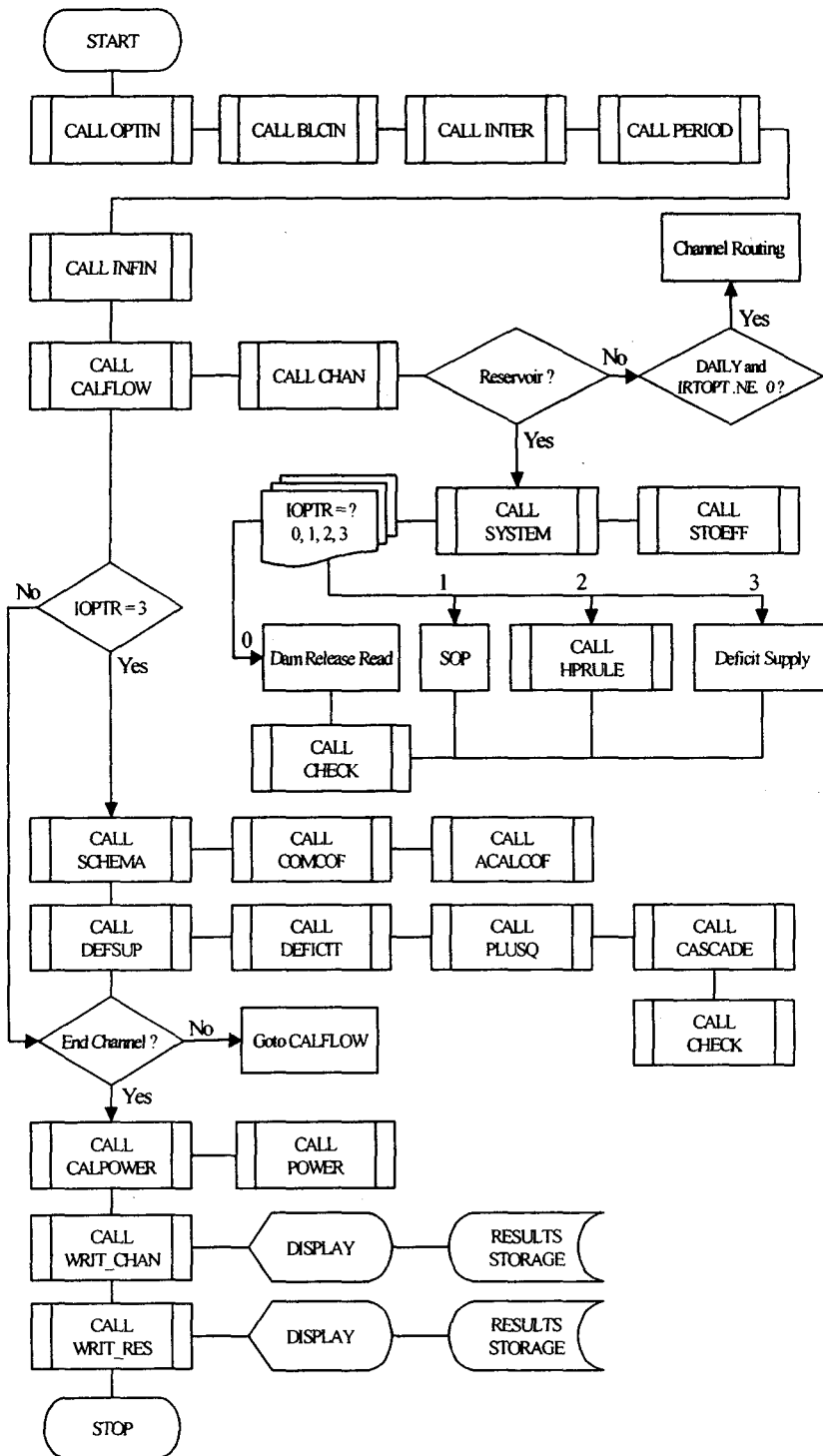


그림 14. 개발모형의 프로그램 수행 흐름도

제 5 장 적용 및 고찰

제1절 대상유역 댐운영 현황

표 5와 같이 2003년 현재 분석대상인 금강유역에서 저류용량 1000만 m^3 이상인 댐은 총 6개 소로서 다목적댐 2개소, 농업용수댐 3개소, 하구둑 1개소가 있다.

대청다목적댐은 수자원의 다목적개발을 위하여 1980년에 건설되었으며, 유역면적은 금강유역의 총 32.3%인 3,204 km^2 (용담댐 건설전 4,134 km^2), 발전시설용량 90MW, 총 저수용량 1,490×10⁶ m^3 , 홍수조절용량 250×10⁶ m^3 이고 댐마루 표고는 EL.83.0m이다. 이 댐의 사업효과로 유역내 대도시의 생·공용수 및 금강하류에 관개용수(설계시 하천유지용수 미고려) 등으로 년평균 1,649×10⁶ m^3 의 용수공급을 담당하며, 90MW의 발전시설용량으로 연간 240GWh의 수력에너지를 생산하도록 계획되었다. 용담다목적댐은 서해안지역 종합개발계획의 일환으로 계획되었으며, 금강본류 60km 지점에 위치하고 있다. 사업효과는 전주권 및 서해안 개발사업지역에 1일 135만 m^3 의 용수를 공급할 수 있으며, 댐하류인 금강 본류측으로는 1일 43만2천 m^3 의 하천유지용수를 공급하게 되고, 아울러 전주권의 용수공급과 댐하류 하천유지용수를 이용하여 연간 198.5 GWh의 수력발전을 하게 된다.

다목적댐 외에 농업용수 전용댐은 4개소로 백곡지, 미호지, 탑정지, 금강하구둑이 있다. 백곡지는 미호천(I)지구 사업으로 1981년 착공하여 1984년 완공되었으며, 미호지는 1982년 착공하여 1986년 준공되었다. 미호지는 중력식 콘크리트댐으로 몽리면적 2,000ha를 관개하는 시설이나 실측결과 계획 유효저수능력 9.0×10⁶ m^3 보다 14%정도가 줄어들어 10년빈도 한발시에는 몽리면적 2,000ha중 약 250ha에 대한 급수부족이 예측된다. 탑정지는 논산천 중류지점에 위치하며, 유역면적은 218.8 km^2 로 1944년에 준공되었다. 탑정지의 규모는 제당길이 573m, 여수토는 익류언식으로 총연장 209.5m, 저수용량은 31.61×10⁶ m^3 의 시설로 5,400ha의 몽리면적을 가지고 있다. 1990년 준공된 금강하구둑의 주요시설로는 하구둑 1.84km, 담수호 1개소, 양수장 9개소, 용수로 696km가 있으며, 연간 365×10⁶ m^3 의 용수공급을 담당한다.

본 연구의 모형적용 및 평가는 이들 댐 중 용담 및 대청다목적댐으로 대상으로 하여 그림 15와 같이 금강수계 시스템을 모식화하였다.

표 5. 금강 유역내 댐 주요 설계제원

구 분	다목적댐		농업용수댐			
	운영중	담수중	백곡지	미호지	탑정지	금강하구둑
	대청댐	용담댐				
▣ 수문사항						
· 수 계	금강	금강	백곡천	미호천	논산천	금강
· 유역면적(km ²)	3,204	930	84.8	133.0	218.8	9,828
▣ 댐						
· 댐형식	CG, ECRD	CFRD	EF	CG	EF	RF
· 댐마루표고(EL.m)	83.0	268.5	103.2	65.0	32.0	7.6
· 댐높이(m)	72.0	70.0	27.2	19.4	17.8	16.6
· 댐길이(m)	495.0	498.0	410	174	573	1,127
· 댐체적(10 ⁶ m ³)	1,234	2,206	-	-	-	2,400
▣ 저수지						
· 계획홍수위(EL.m)	80.0	265.5	-	63.3	30.4	4.62
· 상시만수위(EL.m)	76.5	263.5	100.1	61.0	28.3	1.0
· 저수위(EL.m)	60.0	228.5	83.0	48.0	16.5	-3.0
· 총저수용량(10 ⁶ m ³)	1,490.0	815.0	21.5	13.9	31.6	138.0
· 유효저수용량(10 ⁶ m ³)	790.0	672.0	21.4	13.6	31.5	122.0
▣ 사업효과						
· 홍수조절(10 ⁶ m ³)	250	137	-	-	-	-
· 용수공급(10 ⁶ m ³)	1,649.0	650.4	-	-	40.0	365.0
· 연간발전(GWh)	240~196	198.5	-	-	-	-
▣ 준공년도	1980	2002	1984	1986	1974	1990
▣ 관리기관	수자원공사	수자원공사	진천농조	진천농조	논산농조	농개공

주) 금강하구둑은 농업용수 전용댐으로 분류하여 정리

자료) 1. 다목적댐 운영실무편람(2002, 한국수자원공사)

2. 기존댐 용수공급능력조사(금강수계)보고서(1998, 건교부, 한국수자원공사)

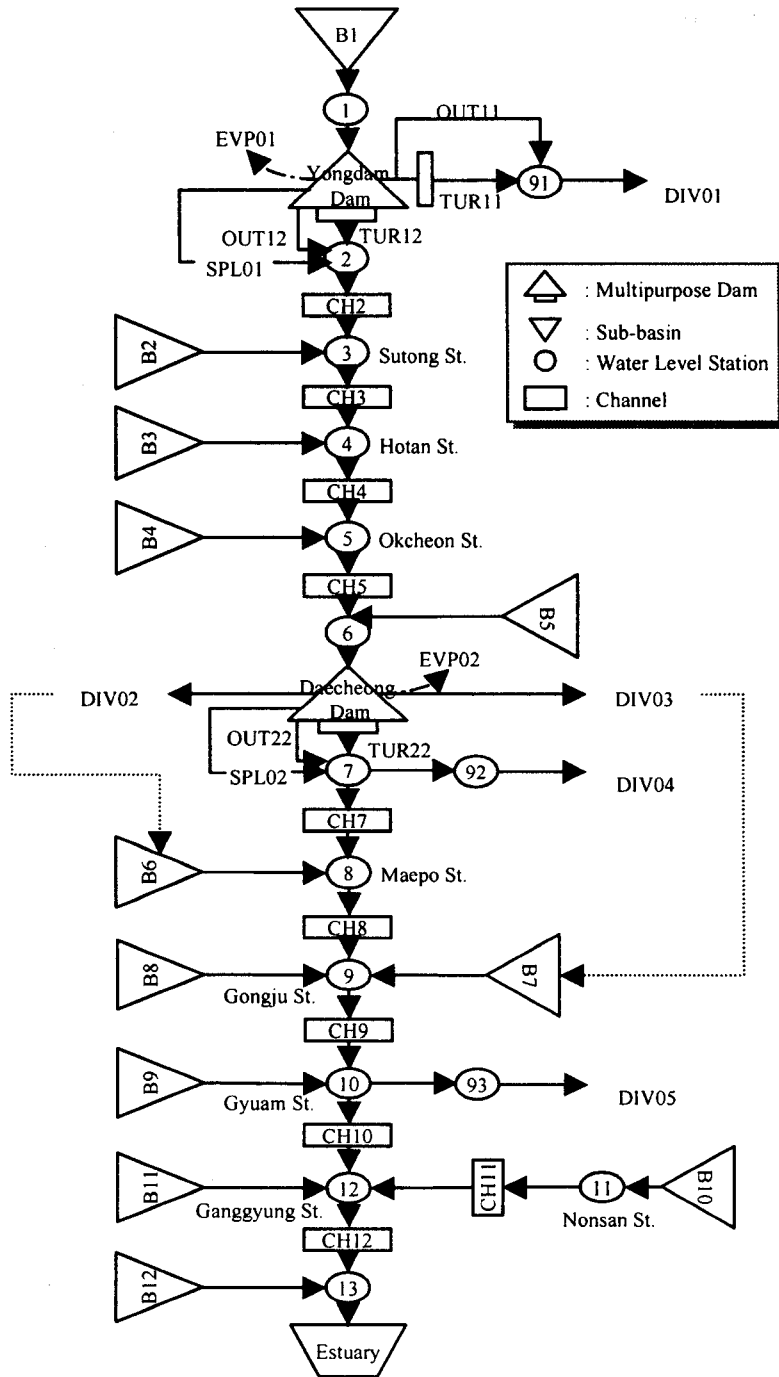


그림 15. 금강수계 시스템 모식도

제2절 모의운영 평가

이 연구에서 개발된 저수지 시스템 모의운영모형을 금강수계내에 병렬로 연결된 용담-대청댐 모의운영에 적용하여 연계운영시의 효과를 검토해보고자 한다.

본 모의운영 모형은 단위운영기간을 사용자의 선택에 의해서 단기운영 및 장기운영을 수행할 수 있도록 개발되었으므로, 자연유량 자료를 사용하여 일별 및 월별 운영기간에 대해 모형에서 댐운영율이 적절히 반영되어 모의하는지를 검토하였다.

검토에서 적용한 다목적 댐별 저수위와 발전운영 제원을 표 6-7에 정리하였다.

표 6. 댐별 저수위 자료

구 분	용담댐(EL. m)	대청댐(EL. m)
사수위	210.0	45.0
취수구표고	226.5	51.7
저수위	228.5	60.0
제한수위	261.5	-
상시만수위	263.5	76.5
홍수위	265.5	80.0
댐정상표고	268.5	83.0

자료 : 1. 기존댐 용수공급능력조사(금강수계) 보고서, 건교부/수공, 1998.11

2. 다목적댐 운영 실무편람, 한국수자원공사, 2002

표 7. 댐별 발전운영 제원

구 분	단위	용담댐		대청댐
		1수력	2수력	
방수위	EL.m	205.0	80.0	30.0
발전시간	hr	24	24	5
발전기 대수	대	2	2	2
최대사용수량	m ³ /s	6.2	17.5	264.0
손실수두	m	2.0	2.0	2.0
발전효율	%	86	86	86.0

표 8. 주요 지점별 월별 목표 유량

단위 : m³/s

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
용담댐	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2	14.2
대청댐	33.1	33.1	33.1	34.2	37.9	80.7	63.5	59.6	55.9	33.1	33.1	33.1
공주	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0	30.0

(1) 월별 모의운영 검토

모의운영 모형을 수행을 위해 임시적으로 1981년부터 2000년도까지 일별로 각 소유역별 자연유량 자료를 작성하였으며, 이 자료를 사용하여 월별 모의운영을 수행하였다. 모형을 수행하는 시나리오는 2가지 조건으로 하나는 정상상태 운영을인 표준운영방안을 적용하는 방안이고 다른 하나는 갈수를 고려하여 댐간 연계운영 방안을 모의하였다.

- 모의운영 시나리오

- ① 수계내 다목적댐에 대해 표준운영방안 적용(SOP)
- ② 수계내 다목적댐 연계운영으로 갈수대응 운영을 수행(연계운영)

가. 수행 결과(시나리오 #1, 월별 표준운영방안 적용시)

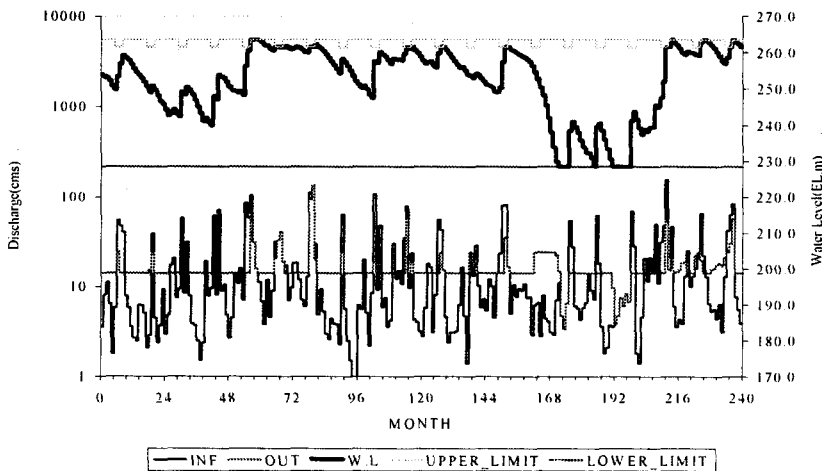


그림 16. 용담댐 월별 모의운영 결과(SOP)

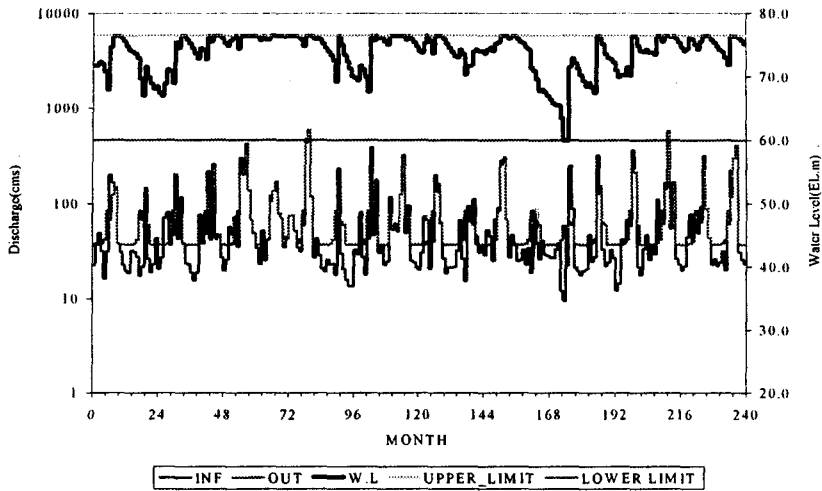


그림 17. 대청댐 월별 모의운영 결과(SOP)

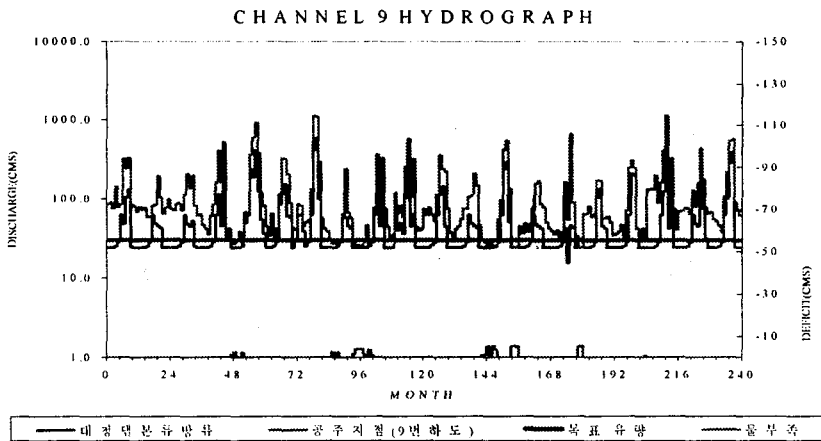


그림 18. 대청댐 분류 방류량 및 공주지점 유량(월별, SOP)

표 9. 월별 모의운영 수행결과(SOP)

구분	용담댐	대청댐	공주
Risk Probability(%)	4.2	0.8	10.0
Resiliency(%)	100.0	100.0	91.7
Vulnerability(m ³ /s)	10.8	41.1	5.5
발전량(MWh/년)	72,619	163,539	-

나. 수행 결과(시나리오 #2)

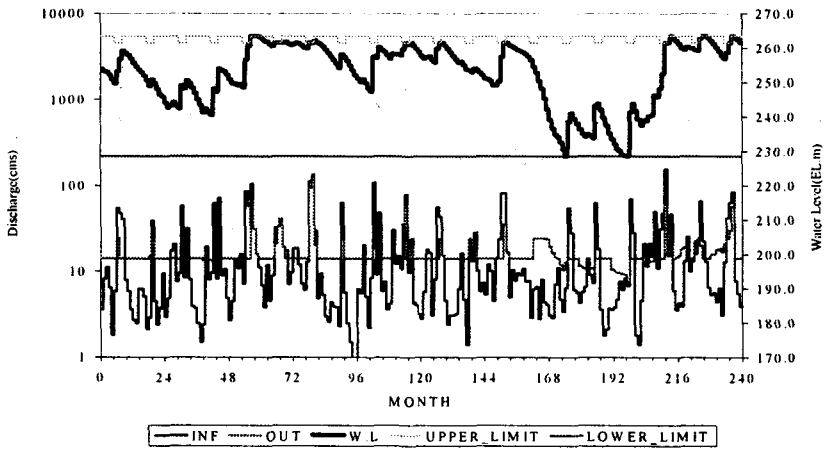


그림 19. 용담댐 월별 모의운영 결과(연계운영)

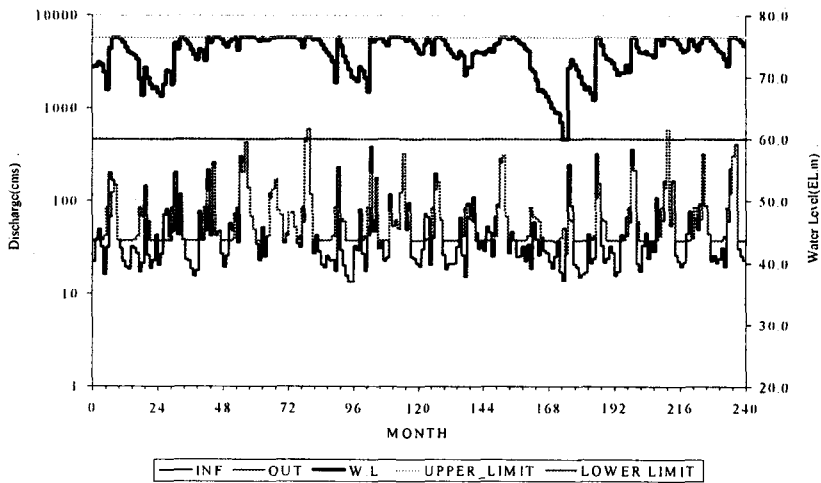


그림 23. 대청댐 월별 모의운영 결과(연계운영)

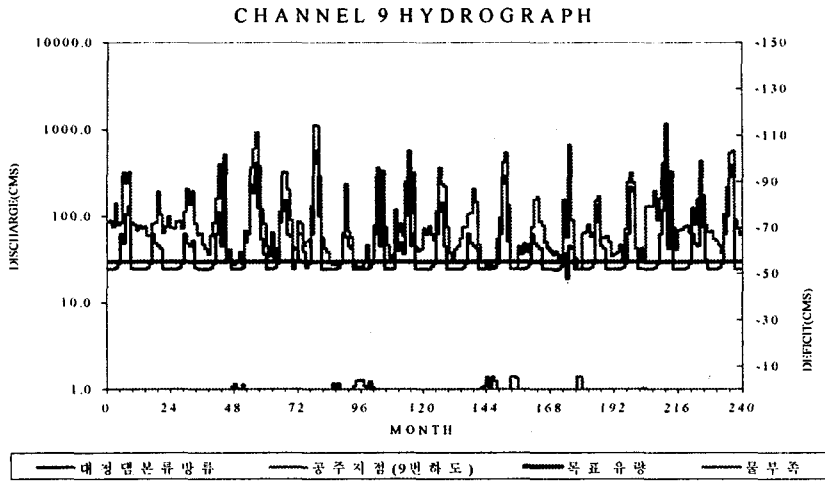


그림 20. 대청댐 분류 방류량 및 공주지점 유량(월별, 연계운영)

표 10. 월별 모의운영 수행결과(연계운영)

구분	용담댐	대청댐	공주
Risk Probability(%)	10.8	0.8	10.0
Resiliency(%)	100.0	100.0	91.7
Vulnerability(m ² /s)	6.8	36.0	5.5
발전량(MWh/년)	73,623	163,237	-

시나리오별 모의운영을 통해서 댐 운영의 거동을 검토한 바 월단위 모의운영 수행에서 저수지 운영이 갈수 대응 댐운영에 부합되게 운영하는 것을 알 수 있었다. 즉, 갈수 대응 운영의 지표중 최대 물부족 심도인 Vulnerability는 감소시키면서 물부족의 위험을인 Risk는 다소 높아지는 경향을 보였는데, 이 때의 복원도는 물부족 발생후에 바로 복원되는 값을 나타내므로 적절히 갈수에 대응하는 운영을 나타냈다.

(2) 일별 모의운영 검토

일별 모의운영은 보유하고 있는 자연유량 기간중에서 갈수가 극심했던 1994년~1995년의 2개년에 대하여 수행 검토하였다. 본 검토에서는 일별 댐군 연계운영의 2가지 시나리오에 대해서 검토를 수행하였다.

- 모의운영 시나리오

- ① 수계내 다목적댐 운영에 표준운영방안 수행(SOP)
- ② 수계내 다목적댐 운영에 연계운영방식을 적용(연계운영)

가. SOP에 의한 운영

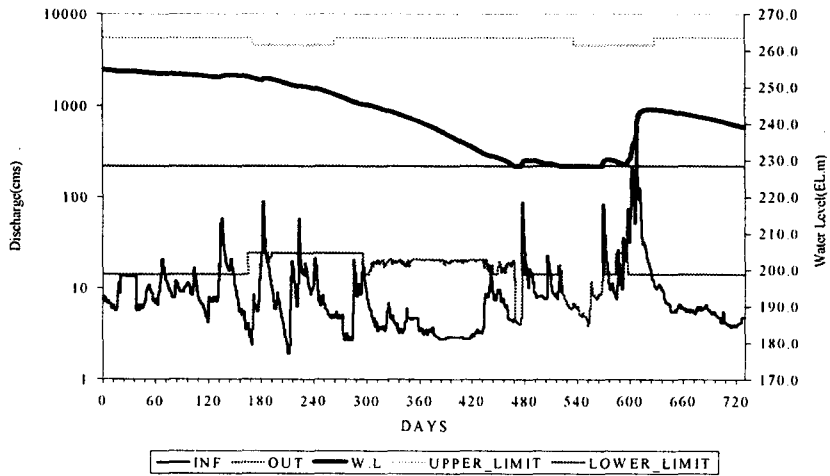


그림 21. 용담댐 일별 모의운영 결과(SOP)

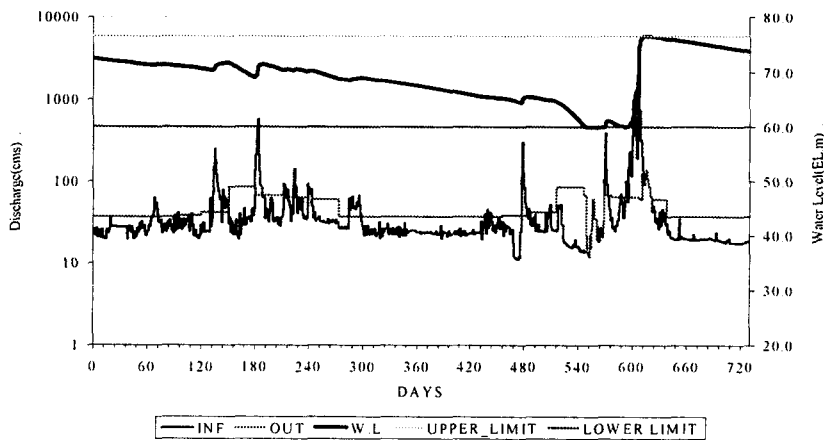


그림 22. 대청댐 일별 모의운영 결과(SOP)

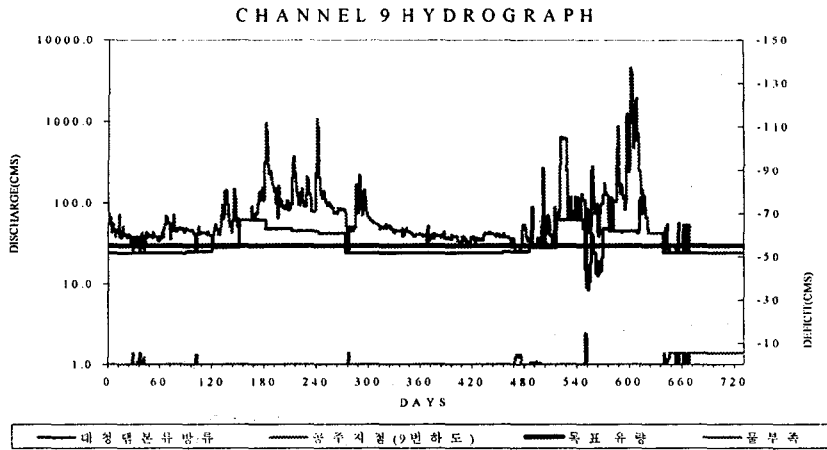


그림 23. 대청댐 본류 방류량 및 공주지점 유량(일별, SOP)

표 11. 일별 모의운영 수행결과(SOP)

구분	용담댐	대청댐	공주
Risk Probability(%)	7.7	2.7	14.7
Resiliency(%)	100.0	100.0	16.4
Vulnerability(m ³ /s)	10.3	51.4	14.6
발전량(MWh/년)	64,826	91,517	-

(2) 연계운영률에 의한 적용

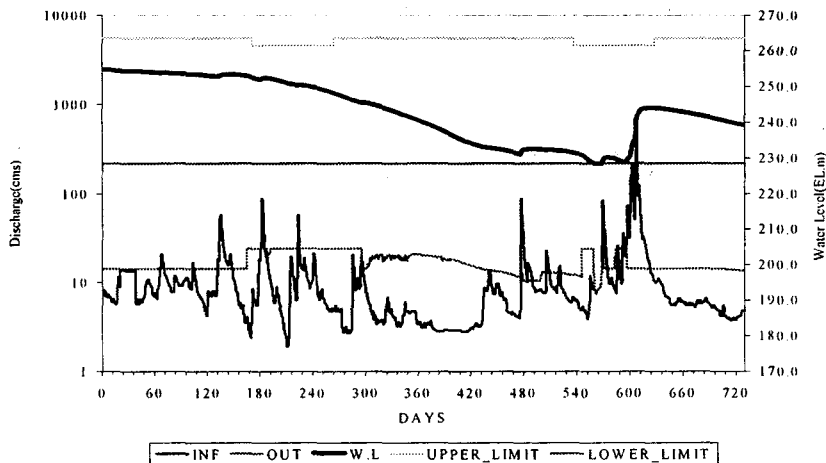


그림 28. 용담댐 일별 모의운영 결과(연계운영)

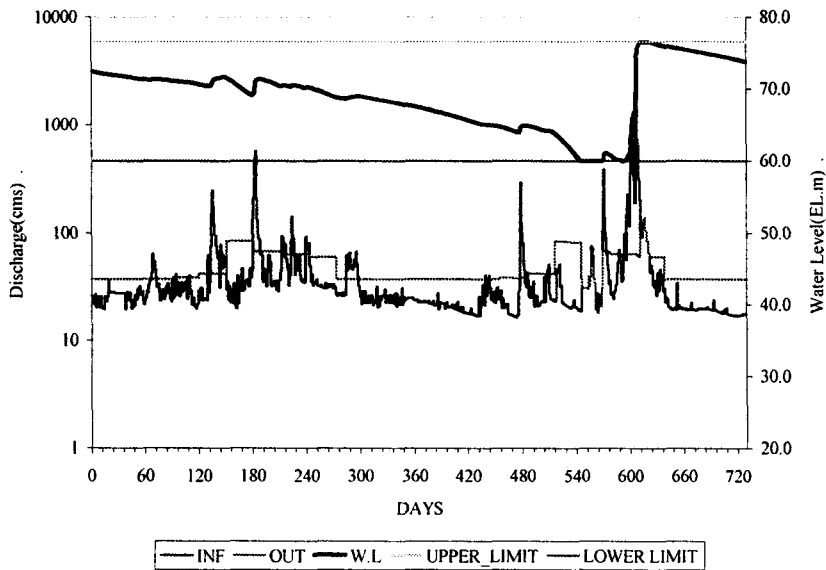


그림 24. 대청댐 일별 모의운영 결과(연계운영)

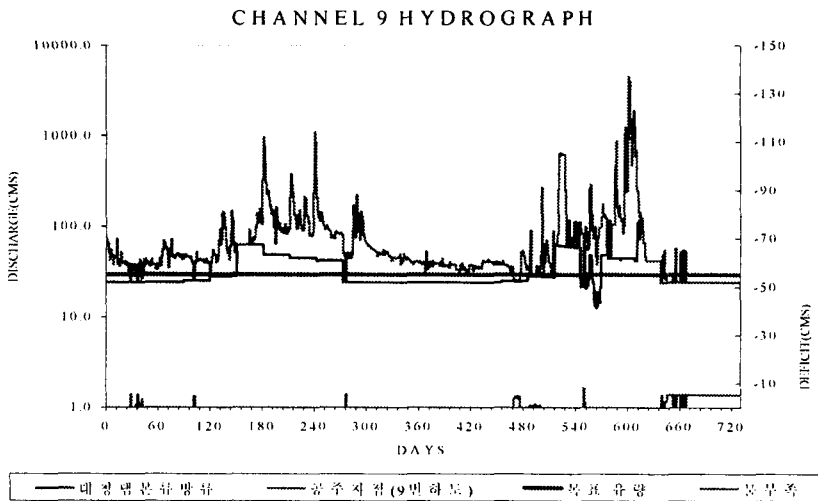


그림 25. 대청댐 분류 방류량 및 공주지점 유량(일별, 연계운영)

표 12. 일별 모의운영 수행결과(연계운영)

구분	용담댐	대청댐	공주
Risk Probability(%)	19.7	3.0	14.7
Resiliency(%)	100.0	100.0	16.4
Vulnerability(m ³ /s)	6.7	45.4	8.0
발전량(MWh/년)	66,466	91,006	-

시나리오별 일단위 모의운영을 통해서 댐 운영의 거동을 검토한 결과 저수지 운영이 갈수 대응 댐운영율에 부합되게 운영하는 것을 알 수 있었다. 즉, 갈수 대응 운영율의 지표중 최대 물부족 심도인 Vulnerability는 감소시키면서 물부족의 위험율인 Risk 확률은 다소 높아지는 경향을 보였는데, 이 때의 복원도는 용담댐 및 대청댐은 2가지 운영검토에서 모두 복원되는 결과를 나타냈으나 공주 지점의 경우는 복원도가 좋지 않은 즉, 연속 물부족 현상이 나타났는데 이는 임시로 사용된 자연유량 자료가 수위-유량곡선식으로부터 모의된 자료였던 관계로 95년 후반기 상당기간동안 소유역별 자연유량 자료가 거의 "0"에 가까운 미소한 양에 기인한 것으로 보여진다. 그러나 전체적으로 적절히 갈수에 대응하는 운영을 보였다.

제 6 장 결 론

이 연구에서는 유역통합물관리를 실제적으로 지원가능한 기술개발의 필요성과 이미 개발된 최적화 운영모형의 적용상의 문제점들을 감안하여 기존 댐저수지의 운영차원에서의 기술을 개선하기 위한 시도로서 이수관리목적 저수지 시스템 모의운영모형을 개발하였다. 모형개발과정에서 다목적댐 운영 관리 업무절차를 고려한 유역 저수지 시스템 운영의 기본틀을 구성한 모의운영모델링 기법을 제시하였으며, 국외의 댐 운영률에 대한 조사, 대상유역인 금강수계의 물관리 특성조사와 댐운영의 제약상황 조사 등을 통해 금강수계에 적용 가능한 댐 운영율을 도출하였으며, 이를 기본으로 개발한 모형을 금강수계 용담-대청다목적댐의 월간 및 일간 운영에 적용하여 모형의 적정성을 평가하였다.

개발된 모형은 수계를 일괄한 물수급 및 수질상황을 반영한 저수지군 연계 운영계획 수립에 사용하게 되면 다음과 같은 저수지 시스템 운영기법의 개선 방안 제시가 기대된다.

- 하도추적을 고려하여 실질적인 deficit-supply 방식의 저수지 운영에도 적용가능 하다. 일단위 운영에서는 유량이 하도구간을 통과하는 시간보다 단위기간이 작은 경우가 발생되므로 이를 모형에 반영해야 하류 주요지점에서 물 부족이 예측될 경우에 이에 대한 적절한 물공급 계획이 제시될 수 있기 때문이다.
- 이미 설정된 방류 방안과의 차이를 최소화하기 위한 방류 전략을 수립하는데 사용될 수 있다. 이러한 모형은 다양한 유입량과 수요 시나리오에 대해서 수행될 수 있고 이를 통해 부족분 또는 초과 유입량 배분이 결정가능하며, 이러한 수행을 통하여 기 설정된 운영율에 접근할 수 있도록 방류 전략을 세울 수 있게 된다.
- 장래의 분석 기간에 대한 유입량과 수요량의 예측 자료를 이용하여 다음 기간의 최적 방류량을 결정하는 데도 이용이 가능하다. 이 모형은 최적화 모형의 수행 결과를 바로 연동시키는 것도 가능하도록 개발되었으므로 최적화 모형에서 결정된 방류량을 토대로 수계내 반응 상황을 곧바로 모의할 수 있다.

아직까지의 국내의 다목적댐 운영은 댐 지점에서 공급해야 할 수요를 충족시키기 위한 firm-supply 방식의 운영에 가깝다. 그러나 앞으로는 유역의 통합적 물관리의 관점에서 수계내 저수지군 시스템이 deficit-supply 방식으로 변환이 요구되며, 이를 위해서는 유역내 물 수급 상황과 수문상황에 대한 정보가 필요하다. 개발된 모형은 이러한 측면에서 수계 전체내의 물 수급상황에 따른 다목적댐에서의 물 배분에 관점을 두고 모형의 범용화와 실용화를 위한 지속적인 보완노력이 필요하다.

참 고 문 헌

- 고석구, 이광만, 고익환 (1992), "다기준 의사 분석 기법에 의한 다목적 저수지의 운영을 평가", 한국수문학회지 제25권 1호
- 고익환, 정세웅, 박명기 (2002), "하천유역 통합물관리 기술 개발동향", 2002 한국수자원학회 기초과제연구보고서
- 고익환, 박상근, 박명기 (2003), "저수지군 운영을 고려한 네트워크 모의모형 개발", 한국수자원학회 학술발표회
- 건설교통부/한국수자원공사 (2001), 낙동강수계 댐군 최적연계운영 시스템개선 연구 보고서.
- 건설교통부/한국수자원공사 (1998), 기존댐 용수공급능력조사(금강수계) 보고서.
- 건설교통부/한국수자원공사 (2000), 수자원장기종합계획 부록(금강권역).
- 권오현 (1984), "저수지 시스템제어에 대한 다단계 선형추적", 한국수문학회지, 제17권, 제1호, pp.37-43.
- 박상근, 고익환, 박명기 (2002), "하천유역 물관리를 위한 네트워크 모의운영 모형 개발", 대한토목학회 학술발표회
- 박명기, 김재한, 정관수 (2002. 2), "위험도 평가기준을 적용한 댐군 최적운영방안 연구(I) - 대청댐을 중심으로 -", 한국수자원학회 논문집, 제35권, 제1호, pp.37~49.
- 박명기, 김재한, 정관수 (2002. 2), "위험도 평가기준을 적용한 댐군 최적운영방안 연구(II)-한강수계 저수지군을 중심으로 -", 한국수자원학회 논문집, 제35권, 제1호, pp.51~64.
- 박명기, 김재한, 정관수 (2002. 10), "단일 저수지의 위험도 평가기준을 고려한 가뭄대비 Hedging Rule 개발", 한국수자원학회 논문집, 제35권, 제5호, pp.501~510.
- 이순탁, 박기호 (1993), "동적계획법을 이용한 낙동강수계 다목적댐 저수지군의 연계운영", 수공학연구발표회논문집, pp.441~450.
- 한국수자원공사 (1991), 신뢰도를 고려한 저수지의 월별 운영을 개발.
- 한국수자원공사 (1992), 한강수계 총주저수지 시스템의 실시간 최적운영을 위한 의사결정 지원시스템 개발(이수관리부분).
- 한국수자원공사 (1996), 낙동강 수계 실시간 최적 저수관리 시스템 개발(분석모델 부분).
- 한국수자원공사 (1997), 기존댐 용수공급 능력조사(한강수계) 보고서.
- 한국수자원공사 (1998), 기술선진화 기본계획 보고서.
- 한국수자원공사 (2001), 수력발전댐의 다목적댐화에 따른 효과분석 연구용역 보고서.
- Barnes, G. W. and Chung, F. I. (1986), "Operational Planning for California Water System", J. Water Resources Planning and Management, vol. 112, no. 1, pp. 71-86

- Bayazit, M., and Unal, N. E. (1990), "Effects of hedging on reservoir performance", *Water Resources Research*, vol. 26, no. 2, pp. 713-719
- Bower, B. T., Hufschmidt, M. M., and Reedy, W. W. (1962), *Design of Water Resources Systems* : Chap. 11. Operating procedures : Their role in the design of water-resources systems by simulation analysis
- Chung, F. I., Archer, M. C., and DeVries, J. J. (1989), "Network Flow Algorithm Applied to California Aqueduct Simulation", *J. Water Resources Planning and Management*, vol. 115, no. 2, pp. 131-147
- Chung, I. and Helweg, O. (1985), "Modeling the California State Water Project", *J. Water Resources Planning and Management*, vol. 111, no. 1, pp. 83-97
- Diaz, G. E. and Fontane, D. G. (1989), "Hydropower Optimization via Sequential Quadratic Programming", *J. Water Resources Planning and Management*, vol. 115, no. 6, pp. 715-734
- Flug, M. and Ahmed, J. (1990), "Prioritizing Flow Alternatives for Social Objectives", *J. Water Resources Planning and Management*, vol. 116, no. 5, pp. 610-624
- Ford, D. T. (1990), "Reservoir Storage Reallocation Analysis with PC", *J. Water Resources Planning and Management*, vol. 116, no. 3, pp. 402-416
- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., and Loucks, D. P. (1982), "Reliability, resilience and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation", *Water Resources Research*, vol. 18, no. 1, pp. 489-498
- Labadie, J. W. (1997), "Reservoir System Optimization Models", *Water Resources Update*, Summer 1997, pp. 83-115
- Loganathan, G. V. and Bhattacharya, D. (1990), "Programming Techniques for Optimal Reservoir operations", *J. Water Resources Planning and Management*, vol. 116, no. 6, pp. 820-838
- Lund, J. R., and Guzman, J. (1999), "Derived Operating Rules for Reservoirs in Series or in Parallel", *J. Water Resources Planning and Management*, Vol. 125, No. 3, pp. 143-153
- Shih, J. S., and Reville, C. S. (1994), "Water supply operations during drought: continuous hedging rule.", *J. Water Resources Planning and Management*, Vol. 120, No. 5, pp. 613-629
- Sigvaldason, O. T. (1976), "A Simulation Model for Operating a Multipurpose Multireservoir System", *Water Resources Research*, vol. 12, no. 2, pp. 263-278
- Tejada-Guibert, A., Stedinger, J. R., and Staschus, K. (1990), "Optimization of Value of CVP's Hydropower Production", *J. Water Resources Planning and Management*,

vol. 116, no. 1, pp. 52-70

Wurbs, R. A. and Walls, W. B. (1989), "Water Rights Modeling and Analysis", J. Water Resources Planning and Management, vol. 115, no. 4, pp. 416-430

Wurbs, R. A. (1993), "Reservoir-System Simulation and Optimization Models", Journal of Water Resources Planning and Management, ASCE, 119(4), 455-472

Wurbs, R. A. (1994), Computer Models for Water Resources Planning and Management, IWR Report 94-NDS-7

Yeh, W. W. (1985), "Reservoir Management and Operation Models: A State-of-the-art review", Water Resource Research, vol. 21, no. 12, pp. 1797-1818

Zagona, E. A., Fulp, T. J., Shane R., Magee, T., and Goranflo H. M., "RiverWare: A Generalized Tool for Complex Reservoir Systems Modeling", Journal of the American Water Resources Association, Vol. 37, No. 4, August 2001