

# Shared Vision 모형을 이용한 용수수급의 안정성 분석

## Water Demand and Supply Stability Analysis Using Shared Vision Model

정 상 만\* / 이 주 현\*\* / 안 중 근\*\*\*

Jeong, Sang Man / Lee, Joo Heon / Ahn, Joong Kun

### Abstract

Recently, the extreme drought is often occurred due to the global warming and the serious weather changes. Also, the problems of the water pollution in the developed areas, the oppositions from people in the upper stream area and water concession from the local governments affect the national request to get more clean water resources in upper stream of the undeveloped areas. It also brings on the necessity of recognition for water supply managements. Therefore, as the water demand is rapidly changes in the metropolitan areas, the capability of water supply from the north Han river basin dams should be appropriately investigated. In this study, we developed a simulation system using STELLA® software environment, a shared vision model, to analyze the possibility of the stable water supply from north Han river basin dams. Also, three different rules are applied on this model by dividing the water level to minimum(Rule 1), medium(Rule 2) and maximum(Rule 3). Using the rules, the safety yield changes are analyzed for dam rule curve of the reservoir and hydropower release.

**Keywords** : STELLA, shared vision model, north Han river basin, safety yield

### 요 지

최근들어 지구온난화와 기상조건의 변화로 기후의 변동폭이 증가하면서 극심한 가뭄이 자주 발생하고 있다. 또한 기 개발된 용수원의 수질 오염, 물 분배에 관한 상류지역의 반대 및 지방자치단체간의 수리권 문제 등도 상류지역으로부터의 맑은 수자원 확보를 필요하게 만드는 요인이다. 따라서 이에 대한 용수공급 관리 방안의 필요성에 대한 인식이 부각되고 있으며, 수도권의 용수수요 변화에 대한 북한강 유역댐의 용수공급 능력에 대한 적절한 검토가 필요한 실정이다. 본 연구에서는 북한강 유역댐의 용수공급 가능성을 파악하고 적절한 용수공급방안을 제시하기 위하여 shared vision 모형인 스텔라 소프트웨어를 이용한 모의 운영시스템을 개발하였다. 또한 이 모형에서는 수위에 따른 평균의 최소, 중간, 최대의 조건으로 3가지 Rule을 정하여 저수지의 운영곡선의 변화와 발전방류에 따른 안전공급을 변화를 분석하였다.

**핵심용어** : 스텔라, shared vision 모형, 북한강 유역, 안전공급을

### 1. 서 론

최근 국제사회는 빈곤의 경감, 환경의 지속가능성,

경제발전, 정치안정에 대한 문제해결을 위해 불문제를 필수적인 선결과제로 받아들이고 있으며 물부족, 수질

\* 공주대학교 건설환경공학부 교수  
Professor, Dept. of Civil & Environmental Eng., Kongju National Univ., Kongju 314-701, Korea  
(E-mail : smjeong@kongju.ac.kr)

\*\* 중부대학교 토목공학과 부교수  
Associate Professor, Dept. of Civil Eng., Joongbu Univ., Chungnam 312-702, Korea)

\*\*\* 공주대학교 토목환경공학과 석사과정  
Grad. Student, Dept. of Civil & Environmental Eng., Kongju National Univ., Kongju 314-701, Korea

악화, 홍수 및 가뭄, 식량확보, 공중위생과 같은 분야에 대해서는 특별한 배려와 신속한 활동이 필요하다는 공감대를 형성하고 있다. 하지만 댐 개발 적지 감소 및 댐 개발단가 상승과 지역주민 및 환경단체들의 반대로 인하여 신규 수자원 개발에 많은 어려움을 겪고 있다. 특히 최근 들어 개발위주의 논리에 반대하여 지속 가능한 개발(Sustainable Development)을 주장하는 환경 관련 시민단체의 논리를 포용하는 새로운 수자원관리 개념(International Institute for Environment and Development, IIED)이 전세계적으로 확산되고 있다. 이에 따라 댐 개발을 최소화하는 가운데 안정적인 용수 공급뿐만 아니라 수질 오염을 최소화하는 댐 운영 방안이 요구되고 엘니뇨, 라니냐 등 기상이변으로 인하여 홍수와 가뭄이 더욱 자주 나타남으로써 효율적인 수자원 관리가 더욱 필요하게 되었다. 친환경적인 신규 수자원 개발 노력뿐만 아니라 수자원 시스템의 종합적인 분석을 바탕으로 효율적인 수자원 관리 방안을 도출하기 위한 노력이 요구된다. 이를 위해서는 유입량 예측, 저수지 연계 운영 모형, 수질 모형, 물관리 관련 시뮬레이션 모형 등을 종합적으로 통합한 의사 결정 지원 시스템의 개발이 필수적인데 서로 다른 모형을 통합하여 개발하는데는 많은 어려움이 있다.

효율적인 용수공급을 위한 물관리 시스템을 위한 모형으로는 미국군 공병단(U.S. Army Corps of Engineers)에서 개발된 HEC-3와 HEC-5 등의 모형 등이 주로 사용되어 왔다. 1990년대 이후 새로운 개념의 Shared Vision 모형이 소개되면서 많은 수자원관리 분야나 수질 모델링에 다양하게 적용되고 있다.

이와 관련된 연구로서 신용노 등(2000)은 예측 강우량에 의한 댐으로의 유출상황을 고려하여 홍수기 댐을 운영 할 수 있는 모의기법에 의한 모형을 개발하여 제시하였고, 박성삼 등(2001)은 다목적댐의 용수공급 능력을 평가하기 위하여 한강 권역, 낙동강 권역, 금강 권역, 영산강 권역, 섬진강 권역별로 댐 유입량에 따른 각 다목적댐의 모의운영을 통하여 가뭄의 정도와 기간에 따른 다목적댐의 저수량 회복 특성 및 가뭄 발생빈도에 대한 다목적댐의 용수공급 능력을 발생가뭄 사상별로 파악 및 평가하였다. 박명기 등(2001)은 금강수계 대형 다목적댐에 대한 물공급의 부족심도(Vulnerability)를 줄여줄 수 있는 헤징(Hedging) 효과를 고려한 운영을 개발하고 이를 이용하여 갈수대용 저수지 상황을 판단할 수 있는 트리거 용량(Trigger Volume)을 산정하였다. 이 용대 등(2002)은 UML(Unified Modeling Language)을 이용한 객체지향 기법을 이용하여 수자원 시스템을 분석하고, 이를 바탕으로 여러 수자원 시스템 분석 모형

과 통합을 통해 종합 의사결정 지원시스템으로 확장 가능한 댐군 최적 연계 운영 모형의 설계 및 개발 방법론을 제시하였다.

이와 같은 수자원 시스템 해석 및 물관리를 위한 최적화 모형의 사용과 함께 최근 Shared Vision 모형이 소개되면서 많은 수자원관리 분야와 수질 분야에 활용되고 있으며 Shared Vision 모형을 활용한 최근의 연구 동향을 분석하여 보면 Palmer 등(2001)은 미국 타코마(Tacoma) 지역의 가뭄관리 계획의 수립을 위해서 Shared Vision 모형을 이용하여 가뭄관리 시스템을 구축하였고 Kim 등(2002)은 표본 추계학적 동적계획법(Sampling Stochastic Dynamic Programming, SSDP) 모형을 낙동강수계 댐군의 최적 방류량 결정에 적용하고 과거 유입량 자료를 이용하여 SSDP/ESP(Ensemble Streamflow Prediction) 등 두가지 모형을 구축한 후, 최적 연계운영 시스템의 모의운영은 실무자가 실제로 댐군을 운영하기 위한 모형으로 스텔라(System Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation, STELLA) 모형을 적용하였다. 또한 정상만 등(2003)은 대형댐과 2001년 완공된 용담댐의 연계운영에 있어서 금강수계의 수자원 장기계획과 관련한 전주 지역의 장래인구추정과, 용담댐과 대형댐사이의 하천유지량량 대형댐 하류의 생태계를 고려한 적정유량 산정에 대한 대전과 전주시역간의 물분쟁을 해결하기 위하여 전문가 시스템을 개발하였다.

본 연구에서 사용되어진 Shared Vision 모형인 스텔라는 이미 미국 및 선진국에서의 다양하게 이용되고 있는 모형으로써 수자원 시스템공학 분야, 최적화기법 분야, 댐 운영 분야 등에 널리 활용되고 있으며, 여기서는 스텔라 소프트웨어를 이용하여 구축한 북한강 유역의 물관리 시스템을 개발하여 단독운영시 북한강 소유역과 연계운영시 북한강 유역 및 수도권 지역을 포함한 용수수요에 대한 용수공급의 안전율을 모의운영(Simulation) 하였다.

## 2. 연구대상 유역 및 Shared Vision 모형의 개요

### 2.1 연구대상 유역

본 연구의 대상유역인 북한강은 유역면적이 10,834.8km<sup>2</sup>(북한지역 포함), 유로연장 317.5km, 평균 하천폭이 약 400m로서 휴전선 이북에 위치하고 있는 단발령(EL1,241km)에서 발원하여 금강천, 수입천, 소양강 및 홍천강 등 큰 지류와 합류하여 유역을 형성하고 있으며, 유로의 평균구배는 남한강과의 합류점으로부터 약 180km 상류의 지점까지가 약 1/1,000정도이다.

북한강 제 1지류인 소양강에는 총저수용량 29억m<sup>3</sup>

(유효저수용량 19억<sup>3</sup>m<sup>3</sup>)의 소양강다목적댐이 있고, 북한강 분류에는 홍수조절능력 5.9억<sup>3</sup>m<sup>3</sup>을 가진 평화의댐으로부터 시작하여 하류 약 24km지점에 총저수용량 10.2억<sup>3</sup>m<sup>3</sup>(유효저수용량 6.6억<sup>3</sup>m<sup>3</sup>)의 다목적 기능을 가진 화천댐이 위치하고 그 하류부로 발전전용댐인 춘천댐, 의암댐, 청평댐 등이 있다.

본 연구에서는 발전없이 홍수조절을 담당하고 있는 평화의댐은 고려하지 않았으며, 남한강과 합류되는 팔당댐은 고려하였다.

## 2.2 Shared Vision 모형

수자원 관리를 위한 모의(Simulation)운영 기법은 복잡한 수자원 시스템을 표현하고 분석하기 위하여 오랜 기간 동안 널리 활용되어 왔다. 이러한 수자원 모의모형은 시스템의 물순환과 수자원시스템의 운영방식 등을 수학적으로 나타낸 후 자료를 입력하여 보여지는 시스템 상에서의 결과를 가지고 물관련 당사자들이 모여 운영에 관한 가능한 많은 대안에 대한 결과를 고려함으로써 최선의 대안을 채택하는 기법이다.

이러한 수자원 모의운영 모형은 일반적으로 고급 프로그래밍 언어인 포트란(FORTRAN)을 통하여 1950년대 이후 개발되어 왔으며, 수자원 분야에 개발되어 널리 알려진 모형으로는 HEC-3, HEC-5, SIMLYD-II 및 CVPower 등이 있다.

포트란 언어로 구성된 모형은 복잡하고 방대한 계산을 효과적으로 처리할 수 있는 장점이 있으나 모형을 개발하는데 많은 노력과 시간이 필요하고, 개발자 이외의 사람이 모형을 사용하고자 하는 경우 프로그램의 수정 또는 보완이 용이하지 않으며, 모형의 수행결과를 일반인에게 효과적으로 전달하기 어려운 단점이 있다. 그러므로, 지금까지 개발된 수자원 모의모형들은 실용화되지 못하고 대부분이 연계개발에만 그치게 되었다(Palmer 등, 1993).

이 단점들을 보완하기 위하여 최근에는 객체지향시물레이션(Object Oriented Simulation, OOS) 소프트웨어의 사용이 증가하고 있는데, 이 모형은 기본 객체(Object 또는 Icon) 들을 컴퓨터 화면상에서 선택하고 연결하여 만들어지기 때문에 모형을 개발하는 데 필요한 시간을 현저히 줄일 수 있고, 프로그램에 대한 전문 지식 없이도 원하는 대로 적절히 모형을 사용하고 수정·보완이 가능하며, 시스템의 구성과 모형의 수행 결과 등을 쉽게 표현할 수 있다(김영오, 1998).

특히, 수자원 관리와 같이 한정된 자원의 효율적 이용에 대한 집단의 이해관계가 얽혀있는 경우 객체지향시물레이션 모형을 이용하면 물관련 당사자들이 초기단

계에서부터 그들의 폭 넓은 의견을 모형에 반영함으로써 보다 현실성 있고 많은 대상에게 신뢰를 줄 수 있는 모형을 만들 수 있다. 이와 같은 Shared Vision 모형은 개발자와 사용자가 그래픽한 유저 인터페이스(User Interface)의 활용으로 다양한 이익단체들의 참여를 도모할 뿐 아니라 여러 가지 선택적 대안을 직접 보여줌으로써 관련 당사자들의 불이익을 최소화하는 의사결정 지원 시스템이다.

## 3. 연계운영을 위한 물관리 모형의 구축 및 적용

### 3.1 북한강 유역의 모의운영을 위한 시스템 구성

북한강 유역의 모의 운영은 가뭄을 고려하지 않은 상태에서 수량의 안전확보를 위해서 불필요한 유출을 줄이는데 초점을 맞추어 모형을 구축하였다. 여기에서 안전 공급율은 극심한 가뭄기간에도 저수지로부터 확보할 수 있는 최대의 수량을 말하는 것으로써 생활·공업·농업용수, 발전용수 및 하천유지유량 모두를 포함하고 있으며 역사적인 기록에 근거하여 일년에 딱 한번만의 저수지 운영 실패를 허용하는 값으로 저수지의 최저안전확보율 97%를 유지하는 값으로 정의하였다. 저수지 운영실패는 수요의 증가로 인하여 물부족이 발생한다는 것을 의미하며, 댐의 사수용량 이하의 물을 공급해야 하는 상황을 나타낸다. 그림 1은 북한강 유역댐의 모식도를 나타낸 것이다.

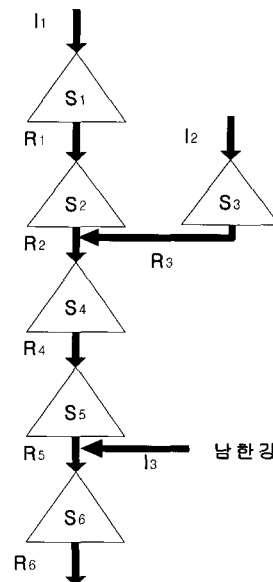


그림 1. 북한강 유역 댐 모식도

#### 3.1.1 목적함수(Objective function)

모형의 목적함수는 용수의 공급과 수요의 차이를 최소화하여 불필요한 물의 손실을 최소화하는데 있다.

며, 여기서 용수수요량은 생활·공업·농업용수, 발전용수 및 하천유지유량을 모두 포함한 값이다. 또한 시간  $t=0$  일때를 초기값을 말하며  $n$ 은 1974년 1월부터 2002년 12월까지 29년간의 자료를 주별로 나타내었으며 사용된 목적함수는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Minimize } F = & \sum_{t=0}^n [(R_{1,t} - D_{1,t}) + (R_{2,t} - D_{2,t}) \\ & + (R_{3,t} - D_{3,t}) + (R_{4,t} - D_{4,t}) \\ & + (R_{5,t} - D_{5,t}) + (R_{6,t} - D_{6,t}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서,  $R_{1,t}$  : 화천댐의 용수공급량( $m^3/\text{week}$ )  
 $D_{1,t}$  : 화천댐의 용수수요량( $m^3/\text{week}$ )  
 $R_{2,t}$  : 춘천댐의 용수공급량( $m^3/\text{week}$ )  
 $D_{2,t}$  : 춘천댐의 용수수요량( $m^3/\text{week}$ )  
 $R_{3,t}$  : 소양강댐의 용수공급량( $m^3/\text{week}$ )  
 $D_{3,t}$  : 소양강댐의 용수수요량( $m^3/\text{week}$ )  
 $R_{4,t}$  : 의암댐의 용수공급량( $m^3/\text{week}$ )  
 $D_{4,t}$  : 의암댐의 용수수요량( $m^3/\text{week}$ )  
 $R_{5,t}$  : 청평댐의 용수공급량( $m^3/\text{week}$ )  
 $D_{5,t}$  : 청평댐의 용수수요량( $m^3/\text{week}$ )  
 $R_{6,t}$  : 팔당댐의 용수공급량( $m^3/\text{week}$ )  
 $D_{6,t}$  : 팔당댐의 용수수요량( $m^3/\text{week}$ )  
 을 나타낸다.

### 3.1.2 상태방정식(System equation)

북한강 유역 댐의 모식도 그림 1에서 상태방정식을 표현하면 식 (2) ~ 식 (7)과 같이 표현된다.

$$S_{1,t+1} = S_{1,t} + I_{1,t} - R_{1,t} \quad (2)$$

$$S_{2,t+1} = S_{2,t} + R_{1,t} - R_{2,t} \quad (3)$$

$$S_{3,t+1} = S_{3,t} + I_{2,t} - R_{3,t} \quad (4)$$

$$S_{4,t+1} = S_{4,t} + (R_{2,t} + R_{3,t}) - R_{4,t} \quad (5)$$

$$S_{5,t+1} = S_{5,t} + R_{4,t} - R_{5,t} \quad (6)$$

$$S_{6,t+1} = S_{6,t} + (R_{5,t} + I_{3,t}) - R_{6,t} \quad (7)$$

소양강 댐 유역의 물이 합류되는 식 (5)와 남한강 유역의 물이 합류되는 식 (7)을 제외한 위의 식을 간단하게 표현하면 식 (8)로 나타낼 수 있다.

$$S_{j,t+1} = S_{j,t} + I_t + M \cdot R_{j,t} \quad (8)$$

여기에서,  $M$  : 행렬로써 저수지의 연결지수

$S_{j,t}$  : 주어진 시간의 각 저수지의 저수량  
 ( $j = 1, 2, 3, 5$ )

$I_t$  : 주어진 시간의 각 저수지로의 유입량  
 ( $m^3/\text{week}$ )

$R_{j,t}$  : 주어진 시간의 각 저수지의 방류량  
 ( $m^3/\text{week}$ )

을 나타낸다.

## 3.2 북한강 유역의 모의운영 프로그램의 구성

북한강 유역 댐의 모의 운영에 이용되는 스텔라는 3가지의 레벨로 구성되어 있으며 모형 개발자와 사용자가 직접 상호의견교환이 가능하고 사용자의 요구와 필요에 따라 언제든지 변경과 수정이 가능한 사용자(User Interface) 레벨과 모형 개발자가 직접 모형을 이용하고 개발하는 개발자(Map/Model) 레벨, 그리고 시스템 알고리즘을 해석하는 방정식(Equation) 레벨로 구성되어 있다. 방정식 레벨은 개발자 레벨에서 작성한 모형을 컴퓨터가 스스로 해석하여 개발자의 요구에 맞는 연산을 수행하는 알고리즘이 방정식레벨에 자동적으로 생성되는 것이 특징이다.

### 3.2.1 사용자레벨

사용자 레벨은 그래프나 테이블을 이용하여 시스템이 반응하는 정도를 직접 확인할 수 있도록 할 수 있는 레벨로써 사용자의 주 관심사를 표현하고 확인할 수 있도록 화면 구성이 가능하고 자유롭게 수정이 가능한 단계이다.

그림 2와 그림 3은 북한강 유역 사용자 레벨에서 작성한 사용자를 위한 북한강 유역의 인터페이스로 북한강 유역의 안전공급율을 분석하기 위하여 구성하였으며, 각각의 아이콘(Icon)이 실제 자료와 연결되어 있어 사용자가 직접적으로 제어가 가능하다.



그림 2. 북한강 유역 모형의 사용자 레벨

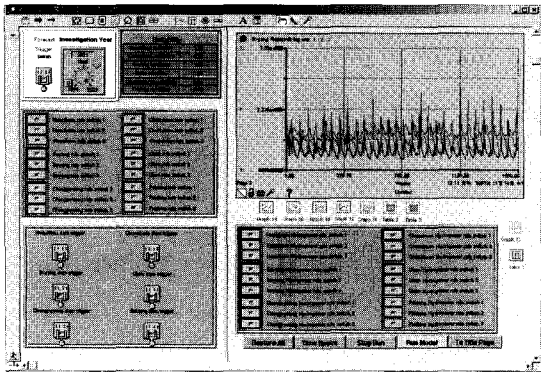


그림 3. 북한강 유역 모형의 사용자 인터페이스

### 3.2.2 개발자 레벨

개발자 레벨에서는 모형개발과 이용에 있어서 모든 매개변수와 목적함수를 비롯한 제약조건, 그리고 시스템의 연계성 등을 구성하는 레벨이다.

그림 4는 북한강 유역 모형의 개요도를 제시한 것으로 사각형(Stock)은 각 댐을 나타내고 있으며, 사각형에서 나오는 화살표(Flow)는 유량의 흐름방향을 나타내고 있고 여러 개의 원(Converter)은 매개변수를 표현하고 있는 것으로 여기서 나오는 화살표(Connector)는 각각의 매개변수를 동적으로 연결해 준다.

또한 자료 입력시 마이크로소프트의 엑셀이나 기타 윈도우 프로그램의 스프레드시트에 있는 자료를 동적인 링크로 연결할 수 있기 때문에 상호간 자료의 수정과 갱신이 가능하다.

### 3.2.3 방정식 레벨

개발자 레벨에서 표현되는 매개변수는 그림 5의 방정식 레벨에 모형의 운영에 대한 모든 정보가 자동적으로 코딩(Coding)된다.

구축한 모형이 구동할 때 에러(Error)가 발생하게 되면 잘못된 연산이 이루어지는 객체(Stock, Flow, Converter)에 물음표(?)가 생성되기 때문에 오류를 쉽게 찾아낼 수 있다.

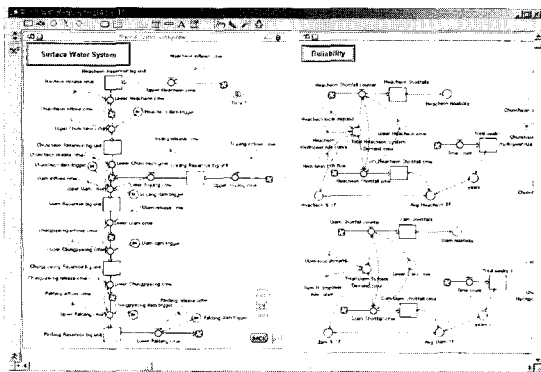


그림 4. 북한강 유역 모형의 개발자 레벨

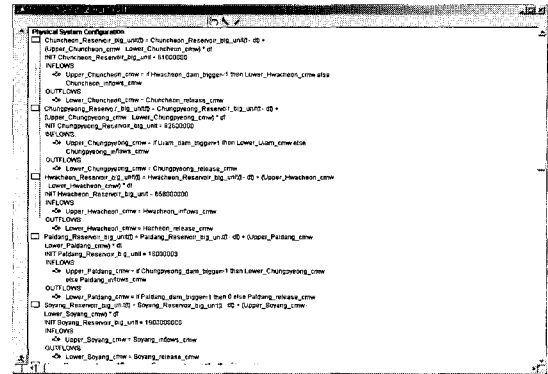


그림 5. 북한강 유역 모형의 방정식 레벨

## 3.3 연계운영을 위한 물관리 모형의 구축 및 적용

### 3.3.1 댐 유입량 자료

북한강 유역의 모의 운영 모형에 입력되는 자료는 발전전용댐(화천, 춘천, 의암, 청평, 팔당 등)이 소양강 댐보다 오래전부터 운영해오고 있어 유입량 자료가 있다 하더라도 연계운영을 통한 동년의 현상 및 특성을 파악하기 위하여 소양강댐이 완공된 1973년 12월 이후 자료, 즉 1974년 1월 자료부터 2002년 12월 자료까지 29년에 해당하는 총 1,513주의 주별 유입량 자료를 사용하였다.

### 3.3.2 유역내 용수수요

1960년대 이후 산업화, 도시화는 물론 국민소득의 증가로 물소비량이 지속적으로 증가하고 있으며 또한 생활수준의 향상으로 물사용에 있어서도 양적으로 풍부하고 질적으로 깨끗한 물공급을 강력히 요구하고 있다. 이와 같은 요구는 특히 인구와 산업이 집중된 도시지역과 주변하천이 오염된 지역에서 심화되고 있는 실정이며, 국민의 욕구를 충족시키기 위하여 정확하고 합리적인 용수수요 모형에 의해 객관적이고 신뢰성 있는 용수수요량을 제시해야 한다.

북한강 유역과 한강 본류에 해당하는 수도권 지역의 용수수요 전망을 예측하기 위하여 본 연구에서는 실제 댐 유입량 자료를 이용해서 추정된 기존댐 용수능력조사 보고서(1997)를 기본 자료로 이용하였다. 수도권의 용수공급을 고려한 북한강 유역의 용수공급 가능성을 파악하기 위해서는 남한강 유역과 북한강 유역에서 팔당댐으로 흘러 들어가는 저수량을 정확히 파악하여 북한강 유역에서 내려가는 물량을 계산해야 하나, 남한강 유역과 북한강 유역에서 유입되는 양을 정확히 측정하고 있지 않기 때문에 표 1에 제시한 것과 같이 남한강과 북한강 유역, 한강 본류의 면적비를 이용하여 수도권 지역의 용수수요를 각각 분배하였다. 따라서 팔당댐

표 1. 수도권 지역의 용수수요에 대한 각 유역의 부담율

	남한강 유역	북한강 유역	한강 본류	합 계
유역면적(km <sup>2</sup> )	12,965.20	10,834.80	2,419.00	26,219.00
면 적 비(%)	49.5	41.3	9.2	100

표 2. 총용수수요량

(단위 : 백만 m<sup>3</sup>/년)

년도	북한강 유역					수도권 지역 포함				
	생활 용수	공업 용수	농업 용수	하천유지용 수	합 계	생활 용수	공업 용수	농업 용수	하천유지용 수	합 계
2001	52.0	15.6	144.6	630.7	842.9	1,508.3	180.7	213.9	2,041.8	3,944.7
2006	57.2	15.7	144.6	630.7	848.2	1,580.3	189.3	213.9	2,062.5	4,046.0
2011	64.1	15.8	144.6	630.7	855.2	1,667.1	197.9	213.9	2,268.7	4,347.6
2016	67.4	15.8	144.6	630.7	858.5	1,721.2	206.4	213.9	2,268.7	4,410.2
2021	74.0	15.8	144.6	630.7	865.1	1,726.0	214.9	213.9	2,268.7	4,423.5

에서 수도권에 공급하는 용수에 대한 북한강 유역의 부담량은 수도권 용수수요의 41.3%만을 고려하여 장래 용수공급 가능성을 분석하였으며 총 용수수요는 표 2에 나타내었다.

### 3.3.3 댐 운영곡선(Rule curve)

댐 운영곡선은 생활·공업·농업 용수를 비롯하여 하류 하천유지유량, 발전방류량 등 가뭄 및 홍수조절기능, 발전기능을 하는 댐의 역할을 고려하여 과거 자료를 바탕으로 계절적 형태와 댐 방류량을 참고하여 만들어진다. 북한강 유역의 댐 운영곡선 또한 계절적 인자, 즉 우리나라 특성상 6월 ~ 8월에 집중적으로 비가 내리기 때문에 장마철을 대비한 저수지의 여유확보와 가뭄을 대비한 저수지의 수량확보를 기반으로 작성하였다. 그림 6은 소양강댐의 운영곡선을 나타내었으며 그림 7은 춘천댐의 운영곡선을 나타내었다.

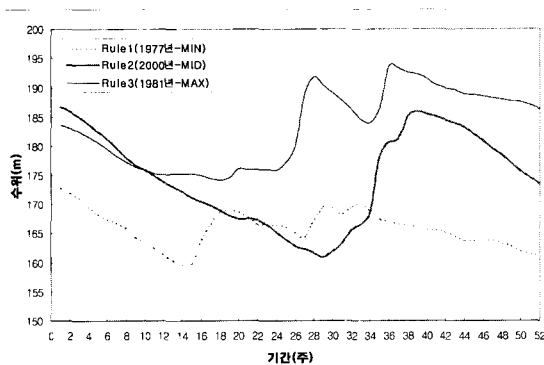


그림 6. 소양강댐 운영곡선(수위)

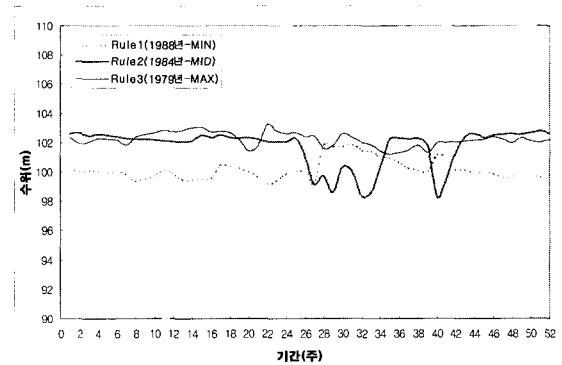


그림 7. 춘천댐 운영곡선(수위)

그림 6과 그림 7에서 알 수 있듯이 소양강 댐 같이 다목적 댐은 생활·공업·농업용수 및 하천유지유량 공급을 위한 이수목적과 홍수조절을 위한 치수목적, 발전 등 다목적적인 용도로 사용되기 때문에 댐 수위가 우리나라 기후 특성 및 생활 특성에 민감함을 잘 나타내며, 화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐 등 발전전용 댐은 발전을 위한 운영 목적으로 하기 때문에 기후의 특성이나 생활의 특성에 민감하지 않고 매년 수위가 일정함을 알 수 있다.

북한강 유역 물관리 시스템에 입력되는 최소값, 중간값, 최대값에 대한 주별 평균수위자료는 표 3과 같이 수위 - 저수용량 곡선식을 사용, 변환하여 모형에 입력하였다.

소양강댐 등 다목적댐의 수위 - 저수용량 곡선식은 다목적댐 운영 실무편람(2000)에 실려 있는 식을 사용하였으며 화천댐, 춘천댐 등 발전전용댐의 수위 - 저수

표 3. 각 댐의 수위 - 저수용량 곡선식

구분	수위 (m)	체적 (백만 $m^3$ )	신뢰도
소양강댐	$H \leq 146.20$	$V = 0.2492917H^2 - 50.12787H + 2595.573$	-
	$146.20 < H \leq 164.80$	$V = 0.0009736153H^3 - 0.09558084H^2 - 11.72056H + 1309.521$	-
	$164.80 < H \leq 180.80$	$V = 0.001858002H^3 - 0.5124463H^2 + 53.25832H - 2035.677$	-
	$H > 180.80$	$V = 0.5489573H^2 - 148.7411H + 10770.96$	-
화천댐		$V = 0.29972663H^2 - 72.621747H + 4420.0795$	0.9868
춘천댐		$V = 0.3202414H^2 - 52.585408H + 2170.2315$	0.9994
의암댐		$V = 8.59 \times 10^{-32} \times (H + 4.52816)^{17.52467}$	0.9996
청평댐		$V = 0.3221723H^2 - 17.855481H + 246$	0.9975
팔당댐		$V = 4.12 \times 10^{-6} \times (H + 4.89453)^{5.239257}$	0.9892

용량 곡선식은 Curve Expert Program을 사용하여 두 가지 유형 구한 후 신뢰도가 높은 것을 사용하였다.

### 3.3.4 발전방류곡선(Hydropower generation curve)

발전방류곡선 또한 댐 운영곡선과 비슷한 개념이나 농업용수나 하천유지유량과는 상관없이 순수 발전방류량을 결정짓는 곡선으로 역사적인 사상을 바탕으로 발전용수로 배출된 수량 기록을 바탕으로 만들어진다.

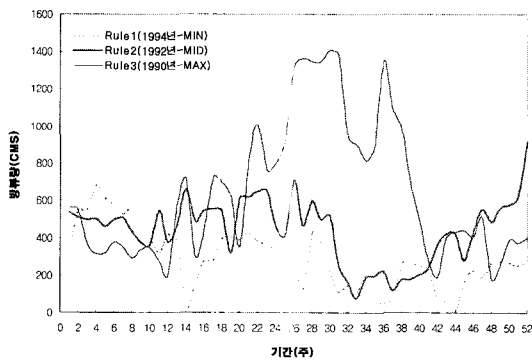


그림 8. 소양강댐 발전방류곡선

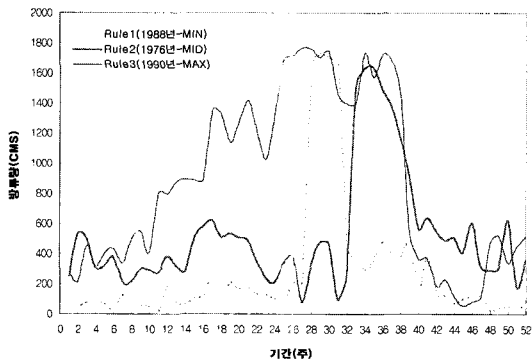


그림 9. 춘천댐 발전방류곡선

그림 8은 1974년 1월 ~ 2002년 12월까지 실제 운영실적에서 1년간의 주별 누계를 통한 발전방류량 값이 최저를 기록했던 1994년을 Rule 1으로 설정하였으며, 중간값을 나타내었던 1992년의 발전방류량을 Rule 2, 최고값의 발전방류량을 기록하였던 1990년 값을 Rule 3로 구분하여 소양강댐의 발전방류곡선을 결정하였으며 그림 9는 최저를 기록했던 1988년을 Rule 1, 중간값 Rule 2, 최고값 1990년 값을 Rule 3로 구분하여 춘천댐의 발전방류곡선으로 결정하였다. 기타 다른댐의 발전방류곡선도 이와 같은 방법으로 결정하였다.

## 4. 물관리 모형의 모의운영 및 결과분석

본 연구에서 구축한 북한강 유역 댐 관리 모형은 소양강댐 운영이 시작한 1974년 이후의 역사적인 사상을 바탕으로 장래에 예상되는 용수수요의 증가를 기존댐 용수능력조사 보고서(1997)에서 예측한 자료를 토대로 가정하여 이 때 반응하는 각 댐의 안전율을 검토하였다. 용수수요의 증가는 저수지 운영의 안정성을 검토할 수 있는 중요한 변수로 용수공급 시스템의 민감성을 분석할 수 있다.

안전공급율은 저수지로부터 확보할 수 있는 최대의 수량으로 생활·공업·농업용수, 발전용수, 하천유지용수를 모두 포함하는 것이다.

본 모형에서는 역사적인 사상에 대한 주별 댐 저수용량과 발전방류량을 기준으로 장래의 안전공급율을 분석하였으며 북한강 소유역별 용수수요에 따른 각 댐에서의 단독운영시 그 결과는 표 4와 같고 북한강 유역과 수도권 지역을 포함한 유역으로 구분하여 댐 연계운영시 결과는 표 5와 같다. 이것은 각 댐에서 주별 저수용량을 북한강 모의 운영을 위한 저수지 운영곡선에서 저수지의 수위 및 발전방류량이 최소값을 Rule 1로 중간

표 4. 북한강 소유역별 용수수요에 따른 각 댐의 안전공급율(단독운영시)

(단위 : %)

년도	댐 운영곡선 (Dam rule curve)	발전방류곡선 (Hydropower generation curve)	화천댐	훈천댐	소양강댐	의암댐	청평댐	팔당댐
2006	Rule 1*	Rule 1 <sup>1)</sup>	66	100	100	100	100	100
		Rule 2 <sup>2)</sup>	66	99	100	98	99	98
		Rule 3 <sup>3)</sup>	66	97	100	97	99	97
	Rule 2**	Rule 1 <sup>1)</sup>	100	100	100	100	100	100
		Rule 2 <sup>2)</sup>	99	99	100	98	99	98
		Rule 3 <sup>3)</sup>	93	98	100	97	99	98
	Rule 3***	Rule 1 <sup>1)</sup>	100	100	100	100	100	100
		Rule 2 <sup>2)</sup>	100	99	100	98	99	98
		Rule 3 <sup>3)</sup>	97	98	100	97	99	98
2011	Rule 1*	Rule 1 <sup>1)</sup>	66	100	100	100	100	100
		Rule 2 <sup>2)</sup>	66	99	100	98	99	98
		Rule 3 <sup>3)</sup>	66	97	100	97	99	97
	Rule 2**	Rule 1 <sup>1)</sup>	100	100	100	100	100	100
		Rule 2 <sup>2)</sup>	99	99	100	98	99	98
		Rule 3 <sup>3)</sup>	93	98	100	97	99	98
	Rule 3***	Rule 1 <sup>1)</sup>	100	100	100	100	100	100
		Rule 2 <sup>2)</sup>	100	99	100	98	99	98
		Rule 3 <sup>3)</sup>	97	98	100	97	99	98
2016	Rule 1*	Rule 1 <sup>1)</sup>	66	100	100	100	100	100
		Rule 2 <sup>2)</sup>	66	99	100	98	99	98
		Rule 3 <sup>3)</sup>	66	97	100	97	99	97
	Rule 2**	Rule 1 <sup>1)</sup>	100	100	100	100	100	100
		Rule 2 <sup>2)</sup>	99	99	100	98	99	98
		Rule 3 <sup>3)</sup>	93	98	100	97	99	98
	Rule 3***	Rule 1 <sup>1)</sup>	100	100	100	100	100	100
		Rule 2 <sup>2)</sup>	100	99	100	98	99	98
		Rule 3 <sup>3)</sup>	97	98	100	97	99	98
2021	Rule 1*	Rule 1 <sup>1)</sup>	66	100	100	100	100	100
		Rule 2 <sup>2)</sup>	66	99	100	98	99	98
		Rule 3 <sup>3)</sup>	66	97	100	97	99	97
	Rule 2**	Rule 1 <sup>1)</sup>	100	100	100	100	100	100
		Rule 2 <sup>2)</sup>	99	99	100	98	99	98
		Rule 3 <sup>3)</sup>	93	98	100	97	99	98
	Rule 3***	Rule 1 <sup>1)</sup>	100	100	100	100	100	100
		Rule 2 <sup>2)</sup>	100	99	100	98	99	98
		Rule 3 <sup>3)</sup>	97	98	100	97	99	98

\* 각 댐에서의 수위가 최소인 년을 기본 조건으로 적용시  
 \*\* 각 댐에서의 수위가 중간인 년을 기본 조건으로 적용시  
 \*\*\* 각 댐에서의 수위가 최대인 년을 기본 조건으로 적용시  
 1) 각 댐에서의 발전방류량이 최소인 년을 기본 조건으로 적용시  
 2) 각 댐에서의 발전방류량이 중간인 년을 기본 조건으로 적용시  
 3) 각 댐에서의 발전방류량이 최대인 년을 기본 조건으로 적용시



표 5. 용수수요에 따른 북한강 유역 댐의 안전공급율(연계운영시)

(단위 : %)

년 도	북한강 유역			수도권 지역 포함		
	Rule 1*	Rule 2**	Rule 3***	Rule 1*	Rule 2**	Rule 3***
2006	100	100	100	100	100	100
2011	100	100	100	93	100	100
2016	100	100	100	91	100	100
2021	100	100	100	89	100	100

\* 각 댐에서 저수지 수위 평균이 최소인 1988년을 기본 조건으로 적용시  
 \*\* 각 댐에서 저수지 수위 평균이 중간인 1976년을 기본 조건으로 적용시  
 \*\*\* 각 댐에서 저수지 수위 평균이 최대인 1990년을 기본 조건으로 적용시

낮은 Rule 2로 그리고 최대값은 Rule 3으로 저수지의 기본 연간 운영 계획으로 각각 적용할 때의 저수지 반응에 대한 안전공급율을 나타낸 것이다.

본 모형에서 각 댐에 대한 용수수요의 안전공급율은 화천댐을 제외한 소양강댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐에서의 댐 운영곡선 Rule 보다는 발전방류곡선 Rule에 따라 달라지지만 각 댐에서 담당하는 용수공급 유역에는 안정적으로 용수를 공급할 수 있는 것으로 나타났다. 이유는 소양강댐과 화천댐을 제외한 다른 댐들은 발전을 목적으로 하기 때문이고 또한 저수용량이 작아서 소양강댐과 화천댐에서 방류하는 하천유지유량과 발전방류량으로도 항상 만수위를 유지할 수 있기 때문인 것으로 분석되었다. 그림 7의 춘천댐에서처럼 발전 전용댐 운영곡선을 보면 최소와 최대의 차이가 비슷하며 계절에 관계없이 항상 일정하게 유지되고 있음에서도 알 수 있다. 반대로 화천댐과 소양강댐은 저수용량이 발전방류량보다 상대적으로 크기 때문에 발전방류를 한다 하더라도 저수용량에는 크게 변화가 없음을 알 수 있다.

연계운동을 통한 모형의 적용은 각 댐들이 담당하고 있는 북한강 유역전체와 수도권 유역으로 구분하여 적용하였다. 이 때 사용한 댐 운영곡선은 각 댐에서의 최소 수위, 중간수위, 최고수위가 년도별로 다르기 때문에 각 댐에서 수위를 평균한 최소값을 Rule 1, 중간값 Rule 2, 최대값을 Rule 3으로 새롭게 적용하였다.

북한강 유역에 적용한 Rule 1, Rule 2, Rule 3로 운영하였을 때, 2006년부터 2021년까지 모두 용수수요를 100%로 만족하는 것으로 나타났다.

수도권 지역의 용수수요량을 포함시켰을 때는 가뭄이었을 당시 운영곡선의 상태를 나타내는 Rule 1으로 적용하였을 때 2006년은 100%로 용수수요를 충족시킬 수 있는 것으로 나타났지만 2011년 93%, 2016년 91%, 2021년에는 89%로 떨어져 용수수요에 대한 용수공급에 문제 발생이 예상되는 것으로 분석되었다. 하지만 평년

의 상태를 나타내는 Rule 2와 비교적 많은 양을 저장하였던 Rule 3을 적용하면 2006년부터 2021년까지 모두 100% 만족하는 것으로 분석되었는데 이를 통해 용수수요에 대한 각 댐에서의 용수공급 능력은 충분한 것으로 판단된다.

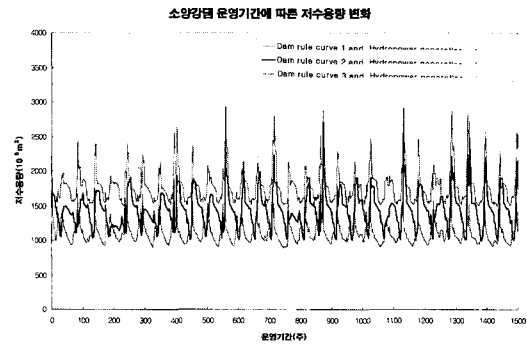


그림 10. 소양강댐 운영기간에 따른 저수용량 변화

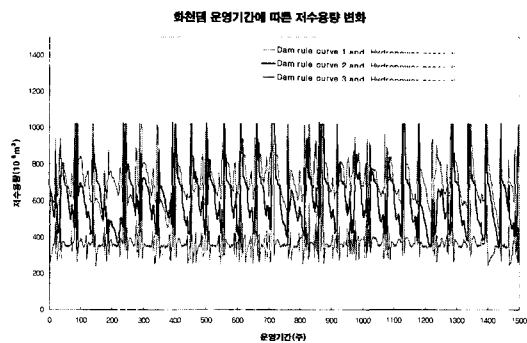


그림 11. 화천댐 운영기간에 따른 저수용량 변화

그림 10 ~ 11은 소양강댐과 화천댐에 대한 댐 운영곡선 Rule 1, Rule 2, Rule 3과 그에 따른 발전방류곡선 Rule 1을 적용하였을 때 운영기간에 따른 저수용량 변화를 나타내었다. 홍수기에 유입량과 댐 수위가 최대로 증가하게 되면 이것이 중첩되어 저수지 용량을 초과하게 되는데 초과되는 부분은 총 저수용량에 맞추어 절사

하여 그림에 표시하였다. 이러한 현상은 주 자료를 활용하였기 때문에 나타나는 현상이며 실제의 일 자료로 적용하면 다량의 유입량과 고수위라 하더라도 발전방류와 여수로 방류를 통하여 방류하기 때문에 총 저수용량을 초과하지 않게된다.

## 5. 결론

수자원 개발이 더 이상 구조적인 방법으로는 진행이 어려운 실정임을 감안하여 본 연구에서는 비구조적인 방법을 이용하여 북한강 유역 물관리 모형의 모의운영을 통한 단독운영시 북한강 소유역과 연계운영시 북한강 유역 및 수도권 지역을 포함한 용수수요에 대한 용수공급을 각 댐에서의 저수량과 안전공급율이 어떻게 변화하는지 분석하였다. 이상과 같은 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

1. 북한강 유역의 물관리 모형을 이용하여 수자원의 수요과 공급의 변화를 파악하고 평가하는 기법 개발을 위하여 저수지 운영곡선의 변화와 발전방류에 따른 안전공급율 변화를 분석해 본 결과, 소양강댐, 화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐에 대한 단독운영시 가뭄기간에 해당하는 화천댐 운영곡선 Rule 1일때 경우를 제외하고는 2021년까지 북한강 유역에 대한 용수수요를 만족시켜주는 것으로 나타났다.
2. 북한강 유역에 대한 각 댐에서의 수위에 따른 평균의 최소(Min), 중간(Mid), 최대(Max)의 조건으로 댐 운영곡선 Rule 1, Rule 2, Rule 3을 적용한 모형의 연계운영 결과는 2006년부터 2021년까지 안전공급율은 용수수요를 만족시켜 안정적인 수자원의 용수공급이 가능한 것으로 나타났다.
3. 북한강 유역 각 댐에서의 수위에 따른 평균의 최소, 중간, 최대의 조건으로 수도권 지역까지 확장하여 고려한 경우는 가뭄에 해당하는 댐 운영곡선 Rule 1을 적용할 경우 2006년에는 안전공급율이 100%로 용수공급이 가능하지만 2011년 93%, 2016년 91%, 2021년 89%로 용수공급량이 부족하게 되어 새로운 대체 수자원 개발이 필요함을 알 수 있다. 하지만 저수지 평균 수위에 해당하는 Rule 2와 저수지의 저수용량이 풍부한 Rule 3을 적용할 경우 2006년부터 2021년까지 안전공급율은 용수수요에 대한 용수공급을 만족시켜 문제가 없는 것으로 예측되었다.
4. STELLA를 이용한 북한강 유역 물관리 Shared Vision 모형은 목적함수와 각종 제약조건을 적용

하여 운영하였을 경우 결과 값이 시스템 상에서 그림 또는 표로 나타나는 등 강력한 사용자 인터페이스(User Interface)의 활용으로 중앙정부(건설교통부, 환경부), 지방정부(경기도, 강원도), NGO (Non-Governmental Organization), 전문가 그룹 및 하천사용자 등 물관련 당사자들이 서로 의견을 교환하고 상의할 수 있는 의사결정지원 시스템이라고 볼 수 있으며, 서로의 이익에 대한 최적조건을 찾아 대안으로 제시한다면 경제적이고 효율적인 수자원 관리가 가능할 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 5-8-1)에 의해 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- 건설교통부·한국수자원공사(1997), **기존댐 용수공급능력조사(한강수계)보고서**, pp. 13-1124.
- 건설교통부·한국수자원공사(2000), **수자원장기종합계획(Water Vision 2020) 보고서**, pp. 109-348.
- 과학기술부(2003), **용수수급 최적화를 위한 가뭄관리 시스템 개발**, pp. 28-122.
- 김영오(1998), 수자원 관리를 위한 Object-Oriented Simulation Software들의 소개, **한국수자원학회지**, Vol. 31, No. 6, pp. 21-25.
- 박명기, 김재한, 정관수(2001), Hedging Rule을 적용한 가뭄대비 다목적댐 운영률 개발, **한국수자원학회 학술발표회 논문집(I)**, pp. 578-583.
- 박성삼, 이동률, 김현준, 신영호(2001), 우리나라 다목적댐 용수공급 능력 평가, **한국수자원학회 학술발표회 논문집(I)**, pp. 533-538.
- 신용노, 맹승진(2000), 모의기법에 의한 홍수기 저수지 운영 모형 개발 (I), **한국수자원학회 논문집**, Vol. 33, No. 6, pp. 745-756.
- 이용대, 김재희, 김승권(2002), 댐군 연계 운영을 위한 객체 지향적 최적 운영 모형의 개발, **2002년 한국수자원학회 학술발표회 논문집(II)**, pp. 673-678.
- 정상만, 류재현, 이주헌, Palmer, R.N.(2003), 유역의 최적 물배분을 위한 공영시각모형의 개발, **대한토목학회 논문집**, Vol. 23, No. 3B, pp. 191-199.
- 한국수자원공사(2000), **다목적댐 운영 실무편람**, pp. 6-138.
- High Performance Systems, Inc.(2002), **An Introduction**

to Systems Thinking, pp. 1 · 1-9 · 11.

High Performance Systems, Inc.(2002), Applications, pp. 1-117.

High Performance Systems, Inc.(1997, 2000), Technical Documentation for the itthink & STELLA Software

Kim, Young Oh, Eum, Hyung Il, Kim, Sang Uk and Lee, Kil Seong(2002), Development of an integrated operation system for the Nakdong river basin, *2002 Annual conference of JSHWR*, Japan Society of Hydrology and Water Resources.

Palmer, R.N. and Tull, R.M(1987), Expert system for drought management planning, *Journal of*

*Computing in Civil Engineering*, ASCE, Vol. 1, No. 4, pp. 284-297.

Palmer, R.N., Keyes, A. M. and Fisher, S.M.(1993), Empowering Stakeholders through Simulation in Water Resources Planning, *Proceedings of the 20th Annual Water Resources Planning and Management Conference*, ASCE, Seattle, pp. 451-454.

Palmer, R.N., Reese, A.G. and Nelligan-Doran, S.E. (2001) Tied by water, *Civil Engineering*, ASCE, Vol. 71, No. 2, pp. 50-53.

(논문번호:04-47/접수:2004.05.04/심사완료:2004.06.23)