

# 우선순위 목적 프로그래밍을 위한 저수지운영을 개발 및 적용

Development and Application of System States for  
the Preemptive Goal Programming

정태성\*, 강신욱\*\*, 황만하\*\*\*, 고익환\*\*\*\*

Tae Sung Cheong, Shin Uk Kang, Man Ha Hwang, Ick Hwan Ko

## 요    지

KModSim은 수자원배분에 관련된 물리적, 수문학적, 제도적, 그리고 행정적인 요구들을 동시에 만족하도록 디자인된 범용 우선순위 목적 선형최적화 모형으로써 자연유3tt입량과 기득 수리권 혹은 기득 저류권 등과 같은 다양한 형태의 저수권 사이의 조화운영이 가능하다. KModSim은 목적함수에 관련된 제약조건의 유연한 설정과 변경이 가능하며, 기존의 최적화 방법과 다르게 유역통합모의에 관련한 모형변수가 모형내에서 자동적으로 생성되도록 프로그램화 되어있다. 본 연구에서는 금강유역내 수자원의 효율적인 운영을 위하여 과거운영자료를 토대로 저수지운영율을 개발하고 시스템단계(system states)를 이용하여 KModSim 네트워크에 운영율을 적용하였다. 금강유역에서 개발한 운영율을 적용하고 모의한 결과 개발된 운영율은 실제저류량을 잘 재현하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 개발된 운영율 및 시스템단계 방법은 다중목적 우선순위 선형최적화 모형을 이용하여 유역의 다양한 수자원운영모의에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 시스템단계, 유역통합모의, 저수지운영율, 의사결정지원시스템

## 1. 서 론

우리나라에서는 지난 20년 동안 강수일수는 14% 줄은 반면, 연강수량은 7% 늘어나 강수강도는 17%나 증가하여 대규모 홍수와 계절적 가뭄의 발생빈도가 높아지고 규모도 커지고 있다. 이러한 상황에서 효율적 수자원관리를 위한 다목적댐과 같은 저수지의 중요성은 더욱 강조되고 있다. 저수지운영은 기후변화를 포함한 미래 수문조건의 불확실성 때문에 더욱 복잡해진다(이재용과 최성규, 2007). 저수지 시스템은 그 속성상 매우 복잡하기 때문에 합리적인 운영결정을 위해 대개 컴퓨터 모델링 기법을 필요로 한다.

본 연구에서는 금강유역내 수자원의 효율적인 운영을 위하여 과거운영자료를 토대로 저수지운영율을 개발하고 시스템단계(system states)를 이용하여 KModSim 네트워크에 운영율을 적용하였다. 금강유역에서 개발한 운영율을 적용하고 모의한 결과 개발된 운영율은 실제저류량을 잘 재현하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 개발된 운영율 및 시스템단계 방법은 다중목적 우선순위 선형최적화 모형을 이용하여 유역의 다양한 수자원운영모의에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 2. KModSim 우선순위 목적 프로그래밍

### 2.1 KModSim 우선순위 목적 프로그래밍

\* 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 공동연구원(E-mail : tscheong@gmail.com)  
\*\* 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 연구원(E-mail : sukang@kwater.or.kr)  
\*\*\* 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원(E-mail : hwangmh@kwater.or.kr)  
\*\*\*\* 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 연구위원(E-mail : ihko@kwater.or.kr)

KModSim은 다양한 흐름조건 하에서 모의가 가능하며, 지표수-지하수 연계를 위하여 다양한 모형과 GIS 자료 및 데이터베이스를 활용하여 계산할 수 있다. 주요 입력자료는 저수지 침투, 증발, 발전, 댐운영율, 수로 손실, 홍수추적, 평평, 회귀수, 평평에 기인한 저류정보, 그리고 지하수흐름에 기인한 저류정보 등이다. KModSim을 이용해 단순히 배분만을 계산할 경우에는 유입량, 용수수요량, 그리고 유지유량이 필요한데, 이는 우리나라에서 기존 물수지 분석에 적용되고 있는 대부분의 자료를 거의 그대로 사용할 수 있다는 것을 의미 한다. KModSim의 최적화는 우선순위를 고려한 네트워크 흐름의 최적화를 의미하는 것으로써 계산시간 ( $t = 1, \dots, T$ ) 동안 식 (1)에 제시된 선형방정식을 풀게 된다. 그리고 노드의 제약조건은 식 (2)와 (3)과 같다.

$$\min \sum_{\ell \in A} c_\ell q_\ell \quad (1)$$

$$\sum_{k \in O_i} q_k - \sum_{\ell \in I_i} q_\ell = b \text{ for all nodes } i \in N \quad (2)$$

$$l_u \leq q_\ell \leq u_u \text{ for all links } \ell \in A \quad (3)$$

여기서  $c_\ell$ 은 링크  $\ell$ 에서의 비용, 가중치 혹은 단위 유량당 우선순위,  $q_\ell$ 은 링크  $\ell$ 에서의 유량,  $A$ 는 네트워크 상의 모든 링크 혹은 아크,  $O_i$ 는 노드  $i$ 에서 시작되는 모든 링크(예: 유출링크),  $I_i$ 는 node  $i$ 에서 끝나는 모든 링크(예: 유입링크),  $b$ 는 시간  $t$ 일 때 노드  $i$ 의 유입(양수) 혹은 수요(음수),  $l_u$ 는 시간  $t$ 일 때 링크  $\ell$ 에서의 하한치, 그리고  $u_u$ 는 시간  $t$ 일 때 링크  $\ell$ 에서의 상한치이다. 네트워크 흐름구조와 특성 등은  $O_i$ ,  $I_i$ ,  $N$ , 그리고 링크 혹은 아크를 위한 아크변수들  $[l_u, u_u, c_\ell]$ 에 의해 정의된다. 그리고 노드 공급량  $b$ 는 네트워크 흐름벡터  $q$ 의 함수로서 네트워크에 포함되어 있지 않은 다양한 제약조건을 모의에 추가할 수 있는 등 광범위한 활용성을 가지고 있다. 이러한 비선형성은 저수지 표면적에 기인한 것으로서 증발산, 지하수 회귀, 하도 손실, 유지유량, 그리고 수리권 혹은 어떠한 우선순위에도 지배를 받지 않는 수요요구량을 만족하기 위한 흐름 등의 함수이다. 식 (2)는 임의의 노드에서 훌러나간 총량이 그 노드 안으로의 총 유입량과 같다는 것을 나타내며, 이것을 노드 제약조건(node constraint)이라 한다. 식 (3)은 모든 링크 흐름에서의 상한과 하한 값이다. KModSim은 저수지와 수요 간의 효율적 연계를 위해 멀티링크를 구성할 필요가 있을 경우 시스템 내에서 동일한 노드 쌍에 여러 개의 링크를 할당할 수 있다. 네트워크 비용 최적화 문제는  $O_i$ ,  $I_i$ ,  $N$ , 그리고  $A$ 의 집합체로서 가정된 초기유입량  $q$ 에 대한  $l_u$ ,  $u_u$ , 그리고  $b$ 와 같은 흐름 매개변수 추정에 의해서 결정된다. 여기서 유량벡터  $q$ 가 제약조건식 (2)와 (3)을 만족하면 타당해라 할 수 있다.

KModSim은 위와 같이 비용을 최소화 하는 네트워크 흐름최적화모형으로써 이를 해석하는 알고리즘으로 초기모형에는 out-of-kilter 알고리즘이 이용되었으나, 최근모형에는 계산시간의 효율성과 선형 방정식의 해석에 있어서 한계성을 보완한 Lagrangian relaxation에 기초한 효율적인 Dual 네트워크 최적알고리즘 해석기법이 사용된다(Bertsekas와 Tseng, 1988a, b). Lagrangian relaxation 알고리즘 해석기법은 out-of-kilter 알고리즘 보다 훨씬 우세할 뿐만 아니라, Primal에 기초한 네트워크 알고리즘보다도 계산 수행 속도 면에서 매우 우수한 것으로 나타났다(Bertsekas와 Tseng, 1988a, b).

## 2.2 저수지 노드의 수문학적 상태

KModSim은 임의의 저수지 또는 수요 노드에 대해 우기, 평시, 건기에 해당하는 3~7가지의 서로 다른 우선순위에 대해서 계산할 수 있다. 가뭄상태를 분석하기 위해 사용자는 필요하다면 최악의 가뭄, 심한 가뭄, 평균적인 가뭄상태로 구분하여 계산할 수 있다(그림 1). 운영모의에서는 수문학적 상태를 우기, 평시, 건기 등 7가지 경우로 구분하고 유입량과 전단계 저류량에 따른 목표저류량을 계산하였다. KModSim은 최적운영을 혹은 실적운영율을 기반으로 설정된 수문학적 상태를 이용하여 유입량에 따른 목표저류량을 계산할 수 있다. KModSim 모형에서는 최대 7단계의 수문학적 상태를 설정할 수 있으며, 각각의 수문학적 상태는 조작 기준의 우선순위를 어떻게 부여하느냐에 따라 저수지 중심의 운영모의를 수행할 수도 있고 수요 중심의 운영모의를 수행할 수도 있다. 이를 수문학적 상태는 다음 식으로 계산된다.

$$R_t = \sum_{j \in H} [S_{jt} + I_{jt}] \quad (4)$$

$$W = \sum_{j \in H} S_{j,\max} \quad (5)$$

여기서,  $H$ 는 수문학적 상태로 정의되는 부분집합에서 저수지 노드수의 합을 나타낸다.  $t$ 는 시간,  $I_{jt}$ 는 시간  $t$ 에 대한 저수지 유입량,  $S_{jt}$ 는 저수지 시간  $t$ 에 대한 저수지 저류량, 그리고  $S_{j,\max}$ 는 저수지 최대 저수용량을 나타낸다. 경계변수  $\beta(i = 1, \dots, n-1)$ 를 이용하여 다음과 같은 수문학적 상태의 단계를 구분할 수 있다.

$$B = \beta W \text{ for } i = 1, \dots, n-1 \quad (6)$$

$$B_{nt} = W \quad (7)$$

여기서  $n$ 은 수문학적 상태의 총 단계 수,  $B_{nt}$ 는 시간  $t$ 에서의 상한치, 그리고  $\beta$ 를  $0 \leq \beta_1 < \dots < \beta_{n-1,t} \leq 1$ 로 정의한다면, 시간  $t$ 에 대한 수문학적 상태범위는 다음과 같이 정의된다.

$$\text{건기 (Dry)} : 0 \leq R_t \leq B_{1t}$$

⋮

$$\text{평시 (Medium)} : B_{i-1,t} \leq R_t \leq B_i$$

⋮

$$\text{우기 (Wet)} : B_{n-1,t} \leq R_t \leq B_{nt}$$

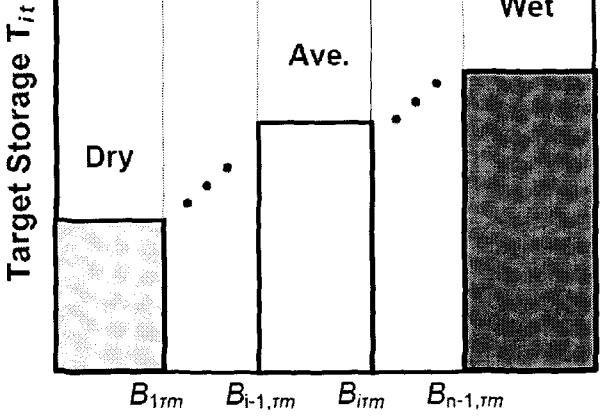
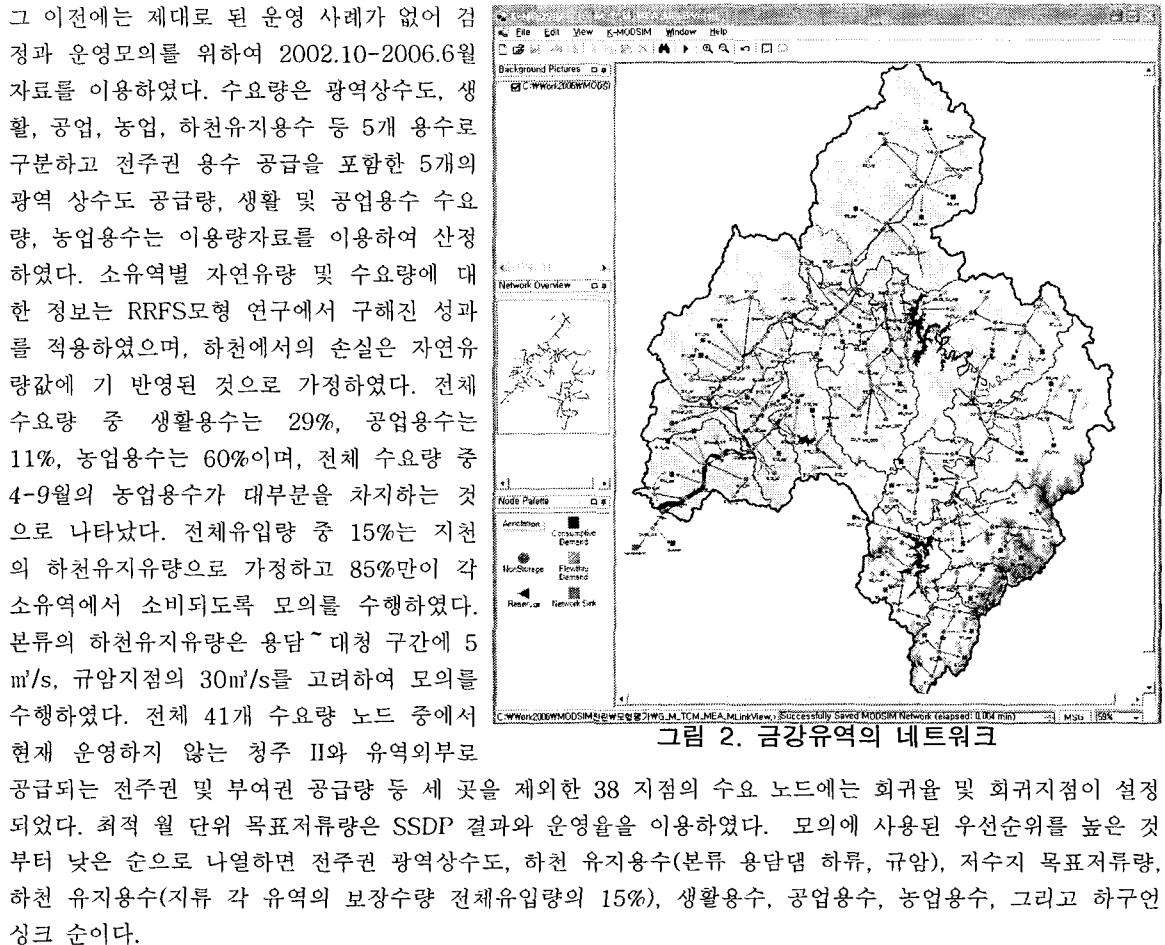


그림 1. 수문학적 상태의 정의

### 3. 금강유역의 KModSim Network 구성 및 입력자료

KModSim모형의 검정과 적용성 검토를 위하여 그림 2에 도시된 것과 같이 금강유역을 14개 소유역으로 구분하고 일 단위 및 월 단위 네트워크를 구성하였으며, 수자원 평가를 위하여 반순 단위 네트워크를 구성하였다. 금강유역에서 저류용량 1,000만m<sup>3</sup>이상인 댐은 총 6개로써 다목적댐 2개소, 농업용수전용댐은 3개소로 백곡지, 미호지, 탑정지, 그리고 금강하구둑 1개소가 있다. 대청다목적댐의 유역면적은 금강유역의 총 32.3%인 3,204km<sup>2</sup>, 발전시설용량은 90MW, 총 저수용량은 1,490×106m<sup>3</sup>이고 댐마루 표고는 EL.83.0m이다. 용담다목적댐은 전주권 및 서해안 개발사업지역에 1일 1.35×106m<sup>3</sup>의 용수와 금강본류로 1일 432×103m<sup>3</sup>의 하천유지용수를 공급하며, 연간 198.5GWh의 수력발전을 하고 있다. 본 연구에서는 대상 유역인 금강 수계의 대청댐과 용담댐 두 개의 다목적댐운영만을 고려하였다.

KModSim의 물리적 검증 및 운영모의를 위하여 RRFS모형을 이용하여 구한 1983년 1월-2006년 6월 기간의 각 소유역별 유입량자료 중 2002.10월-2006.6월 수문자료를 이용하였다. 용담댐의 준공 및 운영이 2000년 이후이며 실제 용담댐 관련하여서는 2002년 여름이 되어서 저수량이 댐 운영에 적합할 정도가 되었으므로



저수지운영에 필요한 목표저류량은 실적저류량으로부터 구해진 용담댐, 대청댐 운영율을 7개의 시스템단계방법을 사용하여 적용하였다. KModSim에 목표저류량을 적용하기 위하여 유입량에 따른 실적운영결과를 토대로 다음 식과 같은 선형회귀모형을 개발하였다.

$$S_t = \alpha(S_{t-1} + I_t) + \beta \quad (9)$$

여기서  $S_t$ 는 현단계 저수지노드 저류량,  $S_{t-1}$ 은 전단계 저수지노드 저류량,  $I_t$ 는 현단계 저수지노드 유입량 그리고  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 회귀계수로써 선형회귀모형을 이용하였다.

저수지운영에 필요한 목표저류량을 산정하기 위하여 본 연구에서는 KModSim의 수문학적 단계방법(한국수자원공사, 2007)으로 목표저류량을 산정하고 저수지모의를 수행하였다.

#### 4. 저수지운영율에 따른 평가 및 결과

용담댐과 대청댐 저류량을 KModsim 모의결과와 비교하여 그림 3에 도시하였다. 운영모의 결과 SSDP 목표저류량을 사용하는 경우와 운영율을 이용하여 목표저류량을 산정하는 경우 모두 용담댐과 대청댐에서 구한 실적저류량에 비해 큰 저류양상을 보이는 것으로 나타났다. 모의기간동안 SSDP 목표저류량을 사용하는 경우 평균저류량은 15.2%상승 그리고 발전량은 24.6% 증가하는 것으로 나타났으며, 운영율을 이용하여 목표저류량을 산정하는 경우 평균저류량은 52% 증가 그리고 발전량은 10.1% 증가하는 것으로 나타났다. 용담댐의 경우 운영율을 이용하여 목표저류량을 산정하는 경우에 가장 큰 저류량을 보이며, 대청댐의 경우는 SSDP

목표저류량을 사용하는 경우에 가장 큰 저류량을 보이는 것으로 나타났다. 일단위 모의 결과를 실적치와 비교한 결과 전체적으로 SSDP에 의한 목표저류량을 사용하는 경우에 비해 운영율을 이용하여 목표저류량을 산정하는 경우에 보다 효율적인 운영이 이루어지고 있음을 보여준다.

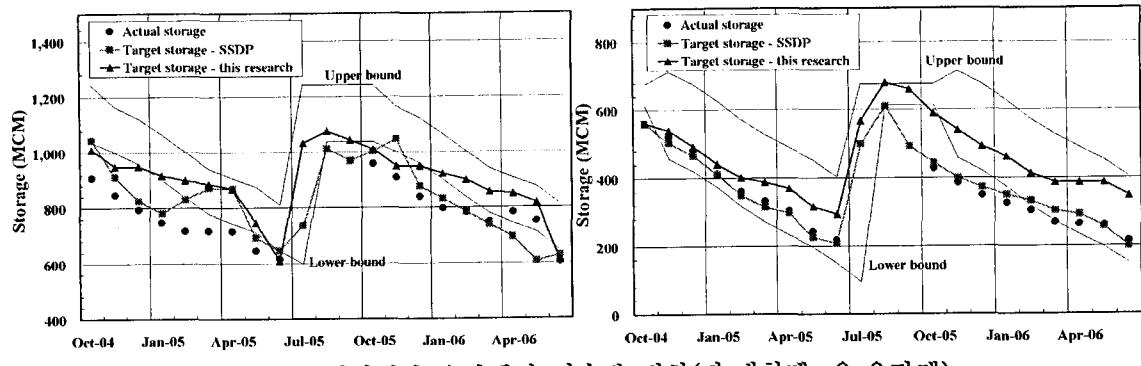


그림 3. 대청댐과 용담댐의 저수량 변화(좌:대청댐, 우:용담댐)

## 5. 결 론

KModSim 모형은 수자원배분에 관련된 물리적, 수문학적, 제도적, 그리고 행정적인 요구들을 동시에 만족하도록 디자인된 범용 우선순위 목적 선형최적화 모형으로써 자연유입량과 기득 수리권 혹은 기득 저류권 등과 같은 다양한 형태의 저수권 사이의 조화운영이 가능하다. KModSim 모형은 목적함수에 관련된 제약조건의 유연한 설정과 변경이 가능하며, 기존의 최적화 방법과 다르게 유역통합모의에 관련한 모형변수가 모형 내에서 자동적으로 생성되도록 프로그램화 되어있다. 본 연구에서는 금강유역내 수자원의 효율적인 운영을 위하여 과거운영자료를 토대로 저수지운영율을 개발하고 시스템단계(system states)를 이용하여 KModSim 네트워크에 운영율을 적용하였다. 금강유역에서 개발한 운영율을 적용하고 모의한 결과 개발된 운영율은 실제저류량을 잘 재현하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 개발된 운영율 및 시스템단계 방법은 다중목적 우선순위 선형최적화 모형을 이용하여 유역의 다양한 수자원운영모의에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 감 사 의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 1-6-2)에 의해 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. 이재웅, 최성규 (2007). "Fuzzy DP를 이용한 저수지 시스템 최적운영 (I)-Fuzzy DP 기법 개발." *대한토목학회논문집*, 제27권, 제1B호, pp. 65-70.
2. 한국수자원공사 (2007). *유역물관리운영기술개발*.
3. Bertsekas, D. P. and Tseng, P. (1988a). "Relaxation methods for minimum cost ordinary and generalized network flow problems." *Operations Research*, Vol. 36, pp. 93-114.
4. Bertsekas, D. P. and Tseng, P. (1988b). "RELAX: A computer code for minimum cost network flow problems." *Annals of Operations Research*, Vol. 13, pp. 93-114.