

우선순위 목적 선형 프로그래밍을 위한  
Backrouting 방법의 개발 및 적용성 검토  
Development and Validation of Backrouting Method for  
Preemptive Goal Linear Programmingver Basin

정태성\*, 강신욱\*\*, 황만하\*\*\*, 고익환\*\*\*\*  
Tae Sung Cheong, Sinuk Kang, Manha Hwang, Ickhwan Ko

요 지

KModSim은 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. KModSim은 목적함수에 관련된 제약조건의 유연한 설정과 변경이 가능하며, 기존의 최적화 방법과 다르게 유역통합모의에 관련한 모형변수가 모형내에서 자동적으로 생성되도록 프로그램화 되어있다. 본 연구에서는 유역내 수자원의 효율적인 운영을 위하여 우선순위 목적 선형최적화 모형을 위한 Backrouting 방법을 개발하고 금강유역 일단위 KModSim 네트워크에 Backrouting 방법을 적용하여 적용성을 검토하였다. 금강유역에 KModSim을 적용하고 모의한 결과 Backrouting 방법을 사용한 모의결과가 Backrouting 방법을 사용하지 않은 경우에 비해 실측치를 보다 잘 재현하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 개발된 Backrouting 방법은 다중목적 우선순위 선형최적화 모형을 이용하여 일단위 모의 시에 발생할 수 있는 과도한 손실을 방지하고자 할 때 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : KModSim, 우선순위, 운영을, 의사결정지원시스템

1. 서 론

우선순위 (preemptive) 목적 프로그래밍 (Can과 Houck, 1984)은 다중목적 최적화 방법으로써 목적함수에 관련된 제약조건의 유연한 설정이 가능하며, 기존의 다중목적 최적화 방법과 다르게 가중치 혹은 계수의 설정과 관련된 문제를 쉽게 해결할 수 있도록 프로그램화 되어있다 (Schultz 1989). 기존의 다중목적 최적화 방법은 하나의 목적을 최적화하기 위하여 다른 목적의 희생을 감수해야 하는 제약이 있으나 우선순위 목적 선형최적화 방법은 운영을 위하여 목적들간의 적절한 균형을 유지할 수 있다. HEC-5, RiverWare (Zagona 등, 1998), MODSIM (Labadie, 1995), WEAP, 그리고 AGUATool (Andreu 등, 1996)과 같은 우선순위 목적 최적화 모형들은 용수공급에 관련된 수리권 혹은 우선순위를 고려한 운영 등의 유연한 설정이 가능하다. KModSim은 우선순위 목적 선형 최적화 모형으로써 금강유역 유역통합시스템의 운영모형으로 개발되었다. 운영자들은 효율적으로 디자인된 그래픽유저 인터페이스를 통해서 KModSim의 물리적 네트워크 구성과 변경을 쉽게 할 수 있으며, 다양한 운영조건과 운영목적들을 쉽게 설정하거나 변경할 수 있는 등

\* 정회원 · 한국수자원공사 수자원환경연구원 연구원 · E-mail : [tscheong@gmail.com](mailto:tscheong@gmail.com)  
\*\* 정회원 · 한국수자원공사 수자원환경연구원 연구원 · E-mail : [sukang@kwater.or.kr](mailto:sukang@kwater.or.kr)  
\*\*\* 정회원 · 한국수자원공사 수자원환경연구원 수석연구원 · E-mail : [hwangmh@kwater.or.kr](mailto:hwangmh@kwater.or.kr)  
\*\*\*\* 정회원 · 한국수자원공사 수자원환경연구원 소장 · E-mail : [ihko@kwater.or.kr](mailto:ihko@kwater.or.kr)

최적화 경험이 부족한 사용자라도 모형의 실행과 결과해석이 가능하도록 모형이 디자인 되어있다. KModSim의 운영목적에 포함된 물리적 제약조건들은 모형내에서 자동적으로 선형화 되며 관련된 가중치 혹은 계수의 설정과 관련된 문제를 쉽게 해결할 수 있도록 프로그램화되어 있다.

KModSim 우선순위 목적 프로그램을 이용하여 흐름추적 혹은 지하수 이용과 관련한 흐름지체를 모의할 경우, 저류효과 때문에 추적링크에 연결된 상류 저수지가 과도하게 유량을 방류하는 경우가 발생할 수 있는데, 이 경우 과도한 방류는 저수지 저류량의 감소를 야기하여 유입량이 부족한 갈수기에 수요부족을 발생시킬 수도 있다. 흐름추적 혹은 흐름지체에 의한 하도내 저류효과 때문에 발생하는 과도한 상류저수지 방류를 조절함으로써 최적 상류저수지 방류를 유도하기 위하여 본 연구에서는 Backrouting 방법을 개발하였다. 개발된 Backrouting 방법의 검증을 위하여 KModSim 단순흐름 네트워크를 구성하고 Backrouting 방법을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 모의결과를 비교하였다. 더불어 금강유역 일단위 KModSim 네트워크에 Backrouting 방법을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 모의결과를 금강유역의 수통지점과 강경지점에서 구한 실측 유량과 비교하는 방법으로 Backrouting 방법의 적용성을 검토하였다.

## 2. KModSim 우선순위 목적 프로그래밍

KModSim은 유역시스템의 물리적 특성을 모형에 유사하게 재현하기 쉽도록 GIS맵 혹은 유역도의 입력기능을 제공하며, 노드들 (저류노드, 비저류노드, 수리권 노드, 수요노드, 그리고 통과수요노드)과 LINK 혹은 ARC를 제공한다. GIS정보, 물리적, 수문학적, 사회, 문화, 생태, 그리고 경제관련 자료를 직접 입력하지 않고도 MS Excel스프레드시트 데이터를 직접 import할 수 있도록 개선된 User Interface를 제공한다. 비록 KModSim의 링크와 노드만으로 유역의 물리적, 수문학적 특성들을 똑같이 재현할 수는 없지만, 사용자는 수자원운명을 모형화 하기 위하여 이들을 가상적 혹은 개념적 요소로 상징화 하여 사용할 수 있다. 사용자에게 의해 정의된 링크와 노드들은 네트워크 모의 시 완전 순환네트워크를 구축하기 위해서 유입과 유출링크를 동시에 갖도록 내부시스템이 구성되어야 하는데, KModSim에서는 계산에 필요한 가상의 노드와 링크를 모형 내에서 자동적으로 생성하고 계산을 수행한다. KModSim 은 계산시간 ( $t = 1, 2, \dots, T$ ) 동안 식 (1)과 같이 우선순위 목적을 최소화하는 선형방정식을 풀게 된다.

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

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 수이며 이때 제약조건은 다음 식과 같다.

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

$$l_{it}(\mathbf{q}) \leq q_{\ell} \leq u_{it}(\mathbf{q}) \quad \text{for all links } \ell \in A \quad (3)$$

여기서  $O_i$ 는 노드  $i$ 의 모든 유출링크,  $I_i$ 는 노드  $i$ 의 모든 유입링크,  $b_{it}$ 는 시간  $t$ 일 때 노드  $i$ 에서의 유입 혹은 유출,  $N$ 는 네트워크 상의 모든 노드 수,  $l_{it}$ 는 시간  $t$ 일 때 링크  $\ell$ 에서의 하한치, 그리고  $u_{it}$ 는 상한치이다. 우선순위 목적 최적화는 물리적인  $O_i$ ,  $I_i$ ,  $N$ , 그리고  $A$ 의 집합체로서 가정된 초기유입량  $\mathbf{q}$ 에 대한 물리적 제약조건들 ( $l_{it}$ ,  $u_{it}$ , 그리고  $b_{it}$ )을 만족하는 범위내에서  $c\mathbf{q}$ 를 최소화하는  $\hat{\mathbf{q}}$ 를 구하는 것이다. 최적화 모의를 위해서는 운영목적과 운영조건들에 관련하여 증발, 발전, 지표수-지하수 연계, 하도손실, 유지유량, 그리고 수리권 혹은 어떠한 우선순위에도 지배를 받지 않는 수요요구량을 만족하는 흐름 등과 같은 비선형 항을 해석하여야 할 필요가 있는데,

KModSim에서는 운영조건과 운영목적들이 자동적으로 우선순위 목적 선형최적화 함수로 변경되도록 프로그램화 되어있으며, .NET을 이용하여 소스코드 변경 없이 선형최적화 함수를 변경하거나 운영조건과 운영목적들의 적용 혹은 삭제가 가능하다. KModSim은 Lagrangian relaxation에 기초한 효율적인Dual 네트워크 최적알고리즘 해석기법을 사용한다 (Bertsekas와 Tseng, 1988a,b). 네트워크 모의 시 완전 순환네트워크를 구축하기 위해서는 모든 노드가 유입과 유출링크를 동시에 갖도록 내부시스템이 구성되어야 하는데, KModSim에서도 이와 같이 계산에 필요한 노드와 링크가 모형 내에서 자동적으로 생성되고 계산된다.

### 3. Backrouting방법의 개발 및 적용성 검토

Backrouting의 목적은 일단위 네트워크의 흐름추적 혹은 흐름지체에 의한 하도내 저류효과 때문에 발생하는 과도한 상류저수지 방류를 조절함으로써 최적저수지 방류를 유도하기 위한 것이다. 하도추적에 의한 저류효과는 크지 않으나 금강유역의 일단위 네트워크의 일부구간에서는 저류효과가 큰 것으로 나타났다. 흐름추적은 추적링크의 상류노드에서 저류에 해당하는 유량이 하류노드로의 흐름에서 제외되었다가 다음단계에서 하류노드로 유입되는 과정을 반복한다. 이러한 반복과정에서 KModSim은 지체흐름에 해당하는 유량만큼 수요를 만족하지 못하는 경우가 발생하는데, 이 경우 하류수요는 수요량을 충족하기 위하여 저수지로부터 더 많은 유량을 요구하게 된다. Backrouting은 추적흐름 혹은 지체흐름 때문에 발생하는 추가요구를 방지하기 위하여 다음단계에서 필요한 수요량에 기반하여 현시간단계에서의 용수공급량을 결정하는 방법으로 KModSim은 추적지역을 구분하고 각각의 추적지역에 대하여 추적모의를 수행한다.

#### 3.1 Backrouting 검증

Backrouting 방법의 검증을 위하여 본 연구에서는 Figure 1과 같이 단순화된 일단위네트워크를 구성하고 Backrouting 방법을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 결과를 비교하였다. 본 연구에서는 결과비교를 통하여 우선순위 목적 네트워크흐름에서의 Backrouting의 이해를 돕고 더불어 갈수기나 가뭄 등과 같은 위기 시의 네트워크흐름모의에서 추적방법을 사용할 경우 Backrouting을 이용해 얻을 수 있는 장점에 대해 설명하고자 한다. Figure 1는 낮은 우선순위를 갖는 저수지가 추적링크에 연결된 두 개의 우선순위가 높은 수요노드에 유량을 배분하는 경우의 예를 도시한 것이다. 본 연구에서는 Backrouting의 장점이 잘 설명될 수 있도록 저수지가 수요를 충족시킬 수 있을 만큼의 충분한 저류량을 가지지 못한 경우에 대해 모의를 수행하였다. 본 연구에서는 검증을 위하여  $c_0 = 0.0$ ,  $c_1 = 0.2$ ,  $c_2 = 0.8$ 의 추적계수를 추적링크에 설정하였으며, 각 수요노드들의 수요는 Table 1에 수록된 요구량을 사용하였다.

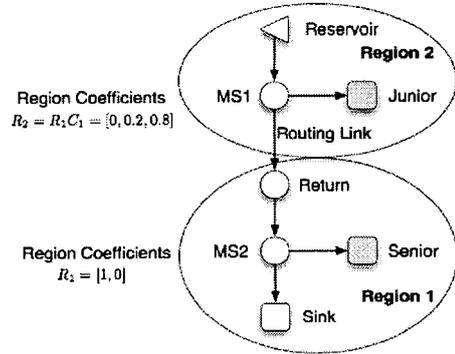


Figure 1 Network Example for the Backrouting.

본 연구에서는 Backrouting 방법을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우의 수요량 결과를 비교하여 Figure 2에 도시하였다. Figure 2(a)에서 Backrouting방법을 사용한 경우 Junior노드에서는 각각 0, 0, 200, 100, 100, 100, 그리고 100의 부족분이 발생한 반면 Backrouting방법을 사용하지 않은 경우는 각각 100, 150, 200, 100, 100, 100, 그리고 100의 부족분이 발생하였다. Figure 2(a)에서 Backrouting방법을 사용한 경우에 Junior노드에서 부족분이 적게 발생하는 것으로 나타났다.

Figure 2(b)에서 Backrouting방법을 사용한 경우 Senior노드에서는 각각 20, 0, 0, 180, 0, 그리고 100의 부족분이 발생한 반면 Backrouting방법을 사용하지 않은 경우는 각각 20, 0, 0, 220, 150, 100, 그리고 100의 부족분이 발생하여, backrouting방법을 사용한 경우에 Senior노드에서 부족분이 적게 발생하는 것으로 나타났다. 각 운영방법의 효율성 평가를 위하여 각각의 수요노드에 대한 신뢰도 (Temporal Reliability), 부족심도 (Vulnerability), 그리고 복원도 (Resiliency)를 구하고 이들을 정리하여 Table 1에 수록하였다. Table 1에서 Backrouting방법을 사용한 경우가 Backrouting방법을 사용하지 않은 경우에 비해 전체적으로 우수한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

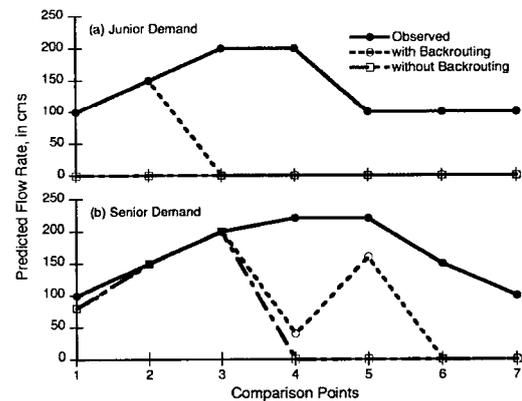


Figure 2 Comparisons of Channel Routing Results with Observed data.

Table 1 Comparisons of Efficiency Values Calculated from Simulated both with Backrouting Method and without Backrouting Method

Methods	Nodes	Number of time periods	Number of failures	Temporal Reliability, in %	Vulnerability, in %	Resiliency, in %
without Backrouting	Senior	7	5	28.6	37.7	25.0
	Junior	7	7	0.00	0.00	14.3
with Backrouting	Senior	7	5	28.6	55.3	25.0
	Junior	7	5	28.6	26.3	20.0

### 3.2 Backrouting 적용

본 연구에서는 Backrouting 방법의 적용성을 검토하기 위하여 금강유역의 일단위 네트워크를 작성하고 일단위모의를 수행하여 구한 결과를 실측치와 비교하였다. 본 연구에서는 모의를 위하여 1984-2006년 기간의 각 소유역별 RRFs 유입량자료를 사용하였으며, 저수지운영을 위하여 과거운영자료를 목표저류량으로 설정하고 모의를 수행하였다. 모의를 위하여 용담댐-수통구간과 대청댐하류-강경구간의 두 구간에 추적링크를 설정하고 각각 [0.33, 0.622, 0.044] 그리고 [0.161, 0.622, 0.161, 0.042, 0.014]의 추적계수를 설정하였다. 본 연구에서는 금강유역의 일단위모의를 위해 COMOM모형에 적용된 추적계수를 그대로 사용하였다. 본 연구에서는 Backrouting 방법을 사용한 경우와 사용하지 않은 경우를 비교하기 위하여 수통지점(Sutong Points)과 강경지점(Kangkyung Points)의 하천유량결과를 비교하여 Figure 3에 도시하였다. Figure 3(a)에서 KModSim모의 결과는 Backrouting방법을 사용한 경우에 수통지점의 실측유량을 보다 잘 재현하는 것으로 나타났으며, Figure 3(b)에서 Backrouting방법을 사용한 경우에 강경지점의 실측유량을 보다 잘 재현하는 것으로 나타났다.

## 4. 결론

KModSim은 수자원배분에 관련된 물리적, 수문학적, 제도적, 그리고 행정적인 요구들을 동시에 만족하도록 디자인된 범용 우선순위 목적 선형최적화 모형으로써 본 연구에서는 모형에서 프로그래밍된 우선순위 목적 선형최적화 방법의 개요를 설명하였으며, 금강유역의 경험을 토대로 실제적용 가능한 모형의 장점을 기술하였다. 본 연구에서는 흐름추적 혹은 흐름지체에 의한 하도내

저류효과 때문에 발생하는 과도한 상류저수지 방류를 조절함으로써 유역내 수자원의 효율적인 운영을 위하여 Backrouting 방법을 개발하고 금강유역 일단위 KModSim 네트워크에 Backrouting 방법을 적용하여 적용성을 검토하였다. 개발된 Backrouting 방법의 검증을 위하여 단순흐름 네트워크에 KModSim 우선순위 목적선형최적화 모형을 적용한 결과 Backrouting 방법을 사용한 모의결과가 Backrouting 방법을 사용하지 않은 경우에 비해 수요부족분이 적게 발생하는 것으로 나타났다. 더불어 금강유역에 KModSim을 적용하고 모의한 결과 Backrouting 방법을 사용한 모의결과가 Backrouting 방법을 사용하지 않은 경우에 비해 실측치를 보다 잘 재현하는 것으로 나타났다. 본 연구에서 개발된 Backrouting 방법은 다중목적 우선순위 선형최적화 모형을 이용하여 일단위 모의를 수행할 경우에 사용될 수 있을 것으로 기대된다.

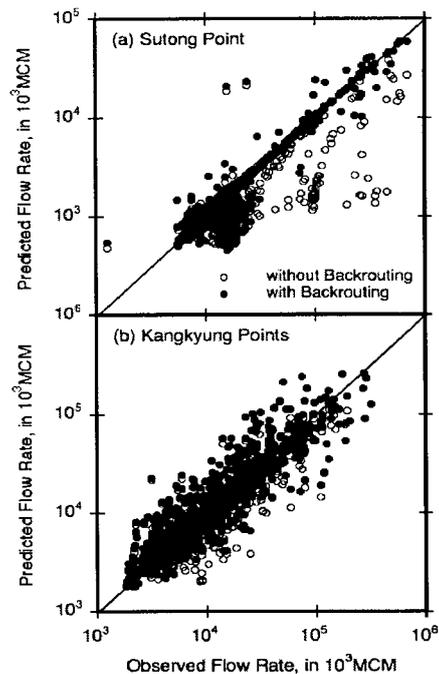


Figure 5 Comparisons of Channel Routing Results with Observed data.

### 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. Andreu, J., Capilla J. and Sanchis E. (1996). AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management. *Journal of Hydrology* 177, 269 - 291.
2. Can, E. and Houck M. (1983). Real-Time Reservoir Operations by Goal Programming. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 110, 297-309.
3. Labadie, J. (1995) River Basin Model for Water Rights Planning, MODSIM: Technical Manual. Department of Civil Engineering, Colorado State University, Ft. Collins, CO.
4. Schultz, G.A. (1989) Ivory tower versus ghosts? or the interdependency between systems analysts and realworld decision makers in water management. Systems analysis for water resources management: closing the gap between theory and practice. *Proc., Third Scientific Assembly of the IAHS*, Baltimore, Wallingford, U.K. p.23-32.
5. Zagona, E., Fulp, T., Goranflo H. M. and Shane R. (1998) RiverWare: A General River and Reservoir Modeling Environment. *Proc., First Federal Interagency Hydrologic Modeling Conference*, Las Vegas, NV, 5-113.