

# K-MOSIM을 이용한 유역통합 실시간 일 저수지 운영

## Basin-Wide Real Time Daily Multi-Reservoir Operation Using K-MOSIM

이진희\*·고익환\*\*  
Jin Hee Lee\*·Ick Hwan Ko\*\*

### 요 지

인구의 증가와 경제의 발전으로 인해 한정된 수자원에 대한 수요가 급증하였고 향후 고도의 복지사회 구현과 지방 자치화에 따른 각종 용수 수요에 대한 심각한 물 배분 문제가 대두되고 있다. 특히 심각하게 물 배분 문제가 야기될 때 각 수요지점별로 필요한 용수를 공급하기 위해서 단지 상류에서 하류 단으로 물을 배분한다면 수리권의 공정성 문제가 제기되며 물 관리 원칙의 결여에 따른 곤란한 상황이 발생할 수 있다. 이렇게 갈수 및 가뭄 시와 같이 물 배분 문제가 생길시에는 우선 하천유역 전체의 가용수량을 파악한 후 각 용수 사용별로 중요성을 감안하여 용수공급 우선순위를 설정하여 전 하천유역을 통하여 일관된 배분을 실시할 수 있는 수자원 최적화 배분 시스템을 개발 할 필요성이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 한국수자원공사 수자원연구원과 콜로라도주립대학에서 공동 개발한 유역 네트워크 유량 모델(River Basin Network Flow Model)인 K-MOSIM을 이용하여 유역통합 실시간 일 저수지 운영 모델을 개발하였다. 개발된 유역통합 실시간 일운영 모델은 금강유역에 적용하였으며, 금강유역을 12개의 소유역으로 구분하고, 용담댐과 대청댐을 포함하며, 유역관리는 용수공급, 지수대책, 발전수력 및 하천 유지용수의 공급등의 유역내 수자원 관리 상황을 포함하였다. 이처럼 유역의 매우 자세한 세부사항을 고려함으로써 기존에 개발된 모델이 가지고 있던 단순화의 단점을 보완하고 유역의 특성을 최대한 반영하도록 하였다. 또한 유역통합 실시간 일운영 모델의 장기적인 저수지 운영 문제를 해결하기 위해 암시적 추계학적 동적계획법을 사용하여 도출된 월운영률을 일운영모델에 적용할 수 있는 방법을 제시 하였다.

**핵심용어:** Daily Reservoir Operation, Dynamic Programming, K-MOSIM, Network Flow Model, River Basin model, 저수지군 운영, 동적계획법

## 1. 서론

인구의 증가와 경제의 발전으로 인해 한정된 수자원에 대한 수요가 급증하였고 향후 고도의 복지사회 구현과 지방 자치화에 따른 각종 용수 수요에 대한 심각한 물 배분 문제가 대두되고 있다. 특히 심각하게 물 배분 문제가 야기될 때 각 수요지점별로 필요한 용수를 공급하기 위해서 단지 상류에서 하류 단으로 물을 배분한다면 수리권의 공정성 문제가 제기되며 물 관리 원칙의 결여에 따른 곤란한 상황이 발생할 수 있다. 이렇게 갈수 및 가뭄 시와 같이 물 배분 문제가 생길시에는 우선 하천유역 전체의 가용수량을 파악한 후 각 용수 사용별로 중요성을 감안하여 용수공급 우선순위를 설정하여 전 하천유역을 통하여 일관된 배분을 실시할 수 있는 수자원 최적화 배분 시스템을 개발 할 필요성이 있다.

이러한 하천유역 중심의 수자원 시스템의 실시간 운영은 다수의 저수지와 취수지점, 자연유입량, 회귀수, 하천유수의 도달시간 문제등을 필요성이 생기며 이에 대한 많은 공학적 노력이 필요하다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 한국수자원공사 수자원연구원과 콜로라도주립대학에서 공동 개발한 K-MOSIM을 이용하여 하천유역통합 실시간 일 저수지 운영 모델을 개발하였다.

본래 MODSIM은 1970년대 중반에 미국 콜로라도주립대학의 John W. Labadie 교수에 의해 개발된 범용 하천유역 네트워크 모형(generalized river basin network model)으로 자연하도 및 인공 취수로 등으로 구성된 복잡한 하천유역에서 가용수자원을 효율적으로 배분하여 시스템의 운영 효과를 최대로 하는 네트워크 최적화 알고리즘을 이용하고 있다. 하천유역의

\* 정회원·한국건설기술연구원 수자원연구부 박사후연구원-E-mail: kolnidre@kict.re.kr

\*\* 정회원·한국수자원공사 수자원환경연구소 소장-E-mail: ihko@kowaco.or.kr

모형에 있어서 네트워크 모형은 복잡한 하천유역 시스템을 노드(Node)와 링크(Link)로서 물리적인 특성을 반영하고 한정된 수자원을 일관된 최적배분을 할 수 있어 순수 시뮬레이션 모형에서 발생할 수 있는 시행착오 과정을 피할 수 있다.

MODSIM은 대다수의 네트워크 모형이 사용하고 있는 OKM(out-of-kilter) 알고리즘(MODSIM 초기 버전도 사용) 대신에 월등하게 수행 속도가 빠른 Lagrangian Relaxation 알고리즘을 채용하고 있으며 초기 버전에서 다소 이해가 어려웠던 모자 저수지(parent and child reservoir) 개념 대신에 저수지 계정(reservoir balance) 개념을 이용하여 보다 사용자 중심의 효과적인 저수지운영을 수행하도록 하고 있다. 또한 사용자의 편의를 위해 제공되었던 Perl 스크립트 언어 대신에 세계적으로 널리 사용되고 있는 마이크로소프트 닷넷 프레임 워크로 사용자 중심의 프로그래밍을 통해 보다 복잡한 하천유역 모의를 가능하게 하였다. 본 연구에서는 하천의 수자원 최적운영을 위하여 최적배분 시스템 모형을 금강유역에 적용함으로써 본 모형의 적용성을 평가하고자 하였다.

## 2. 실시간 하천유역 물 관리를 위한 K-MODSIM의 적용

### 2.1 네트워크 최적화 모형 기본이론

네트워크 최적화 모형에서는 실제 수자원 시스템의 물리적 요소는 노드와 링크로 구성하게 된다. 여기서 노드는 다시 저수지, 하천 및 수로의 합류점, 각 용수의 수요지점 등을 나타내며 링크는 두 노드를 연결하는 것으로서 하천 및 수로, 송수관로 등을 나타낸다. 네트워크 개념에 의한 최적배분 시스템은 수자원 시스템내의 모든 노드에서 질량의 보존과 각 링크에서의 흐름은 최소치와 최대치의 범위를 만족시킨다는 조건하에서 식(1)과 같이 비용을 최소화 하는 것으로 나타낼 수 있다.

$$\text{Min} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij} Q_{ij} \quad (1)$$

여기서,  $Q_{ij}$ 는 노드  $i$ 로 부터 노드  $j$ 까지의 평균흐름( $m^3/month, m^3/day$ ),  $C_{ij}$ 는 노드  $i$ 로 부터 노드  $j$ 까지의 링크에 있어서 흐름의 단위비용이며,  $N$ 은 네트워크내의 링크의 총수 이다. 결국, 식(1)은 수자원 시스템 네트워크 내에서 노드간의 총 흐름 비용을 최소화하는 것으로 목표 저수량을 포함한 각 용수 수요지점의 중요성에 따라 수자원의 우선순위를 고려한 배분 하게 된다. 여기서 비용은 가상적 비용을 사용하여 상대적인 우선순위를 결정하거나 실제적 경제 비용을 사용 할 수 있다.

### 2.2 하도추적(streamflow routing) 및 수요량에 따른 역추적(backrouting) 기능

하천수 운영 모델에 있어서의 하도추적은 어떤 하천 구간에 있어서 하류의 하천의 유량(flow rate 또는 volume)을 상류의 유량이나 수량의 함수로 나타내는 일련의 절차를 의미한다. 각 주요노드(취수 및 배수, 저수지 등의 주요 수리구조물이 위치해 있는 노드)간의 하천수 하도추적은 하천의 전체 유하시간이 시뮬레이션 또는 모니터링 되어지는 시간 단위보다 큰 경우에 필요하게 된다. 일반적으로 주 단위 이상의 운영모의의 경우 노드간의 유입이나 손실이 없는 경우 상류노드의 월평균 유입량과 하류노드의 월평균 유입량이 같은 것으로 가정되지만, 일 운영 모의의 경우 하천수의 유하시간이 하류이상으로 하도추적이 필요하다.

MODSIM의 경우 수문학적 하도추적 방법인 Muskingum식에 의해 하도추적 계수를 결정할 수 있으며 이 방법을 통한 하도추적은 하류노드의 유입량을 상류노드의 유출량의 식 (2)와 같은 선형함수로 표현하고 있다.

$$O_n = C_1 I_n + C_2 I_{n-1} + C_3 I_{n-2} + \dots \quad (2)$$

여기서,  $O_n$ 은  $n$ 시간에 있어서의 상류노드 수문곡선의 유출량이며,  $I_n$ 은  $n$ 시간에 있어서의 하류노드 수문곡선의 유입량을 나타내고,  $C_1, C_2, \dots$ 는 하도추적 계수이다. 이처럼 하도추적을 운영모델에 적용할 경우 네트워크 최적화 모형의 특성상 최초의 하도추적계수( $C_1$ )이 매우 작고 하천유역의 물부족이 심각하고 저수지에 저수하려는 우선순위가 하류 수요노드의 우선순위보다 낮은 경우에 저수지의 물을 하류의 수요노드로 방류하게 되는 문제를 일으키게 된다. 이 경우 MODSIM의 수요량에 따른 역추적(backrouting) 기능을 활용하여 하도추적을 통하여 물공급이 불가능한 경우 저수지로 부터의 방류량을 제한 기법을 활용 할 수 있다.

## 2.3 불확실성을 고려한 월별 목표저수량의 설정

유역내에 발생한 강우로부터 유입되는 유입량은 예측이 어렵고 제어가 불가능한 추계학적 요소이므로 이를 바탕으로 결정되는 저수지 운영률 역시 추계학적특성이 포함 될 수 밖에 없다. 또한, 최적화 모형 등을 활용하여 도출된 운영률의 불확실성을 고려할 필요성이 생긴다. 효율적인 하천유역의 물 관리를 위해서는 기결정된 저수지 운영률에 의해 포함된 추계학적 특성과 운영률에 내재된 불확실성을 고려하기 위하여 현시점에서의 하천유역내의 용수수요를 충족 시킬 것인지 저수지에 저수할 것인지를 결정하는 것이 매우 중요하다. 본 연구에서는 MODSIM의 저수지 계정(reservoir balance) 개념을 이용하여 기결정된 저수지 운영률에 내재된 불확실성과 추계학적 특성을 최소화 할 수 있다.

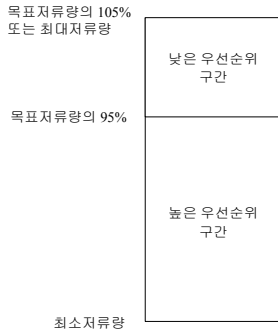


그림 1 월별 목표저수량 설정 예

그림 1에서 보는 바와 같이 불확실성이 5%설정된 경우 최적화 운영률에 의해 제시된 목표 저수량을 중심으로 5% 하위 저류량(95% 목표저류량), 5% 상위 저류량(105% 목표저류량 또는 저수지 최대저류량)을 설정할 수 있다. 우선 95% 목표저류량 이하의 우선순위를 상대적으로 높게 설정하여 저수지 저류함으로써 월별 운영률에 충실하도록 하며 반대로 95% 목표저류량 이상의 상대적으로 우선순위를 낮게 설정하여 현재의 용수 수요를 우선 만족하거나 미래에 사용할 수 있도록 하도록 하고 있다.

## 2.4 물부족량 분담 알고리즘(Deficit sharing algorithm)

갈수 및 가뭄 등의 시기에 물이 심각하게 부족할 경우 하천유역의 각 물수요량을 상류에서 하류로의 단순한 물 배분 방식은 상류단의 물수요량을 만족시킬 수 있지만 하류단의 물수요량을 전혀 만족 시킬 수 없어 공정성에 문제가 발생할 수

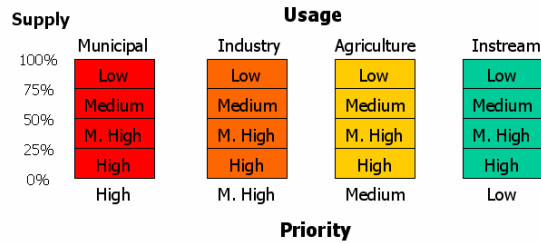


그림 2 물부족량 분담 알고리즘

있다. 이처럼 상하류의 수요량에 대한 공정한 물 배분을 유도하기 위하여 물부족량 분담 알고리즘을 개발하여 모형화 할 수 있다. 그림 2에서 보는 바와 같이 생활용수, 공업용수, 농업용수, 유지용수 순으로 중요도가 정해진 경우 이들의 지점별 중요도가 각 수요량에 대한 비율 혹은 블록을 정하여 공간적으로 공정한 물배분을 유도하는 것이 이 알고리즘의 목적이다. 단, 물리적으로 물배분이 불가능한 수요지점은 자동으로 배제되고 다음 비율 혹은 블록으로 물배분이 진행되어진다.

## 3. 금강 유역에 대한 적용 사례

본 연구의 적용유역으로는 그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 12개의 소유역과 용담댐, 대청댐 그리고 본류 및 소유역에서의 용수수요로 구성되며 각 소유역의 유입량 자료는 강우-유출 모형으로 산정된 자연유량을 제공 받아 사용하였다. 본 연구의 용수수요는 용담댐과 대청댐을 주요 공급원으로 하는 전주, 전주, 대전, 청주 및 본류를 따라서 신탄진, 공주, 부여 등의 용수 수요지점을 수자원공사 실적자료에 따라 고려하였다. 농업용수는 기존의 보고서(건설교통부, 1998)를 기준으로 금강 본류에 분배하였다. 각 용수에 따른 회귀율은 강우-유출모형을 이용한 12개 소유역의 자연유량 선정 시 사용되었던 생활용수와 공업용수는 65%농업용수는 35%가 회귀된다고 가정하였다.

금강유역 네트워크 시스템 모형을 구축하기 위해서 필요한 용수의 우선순위는 각 용수수요점의 경제적, 정치적, 사회적인 시스템 분석과 지연주민 및 전문가의 자문을 통하여 결정하여야 하나 본 연구에서는 연구자들 간의 협의를 통하여 생활용수, 공업용수, 농업용수, 하천유지용수의 순으로 우선순위를 정하였고 소유역의 용수수요에 대해서는 본류보다 높은 우선순위를 주었다. 또한 갈수 시 각각의 용수수요에 대한 물부족량 분담 알고리즘을 활용하기 위하여 25%, 50%, 75%, 100%

의 용수수요블럭을 설정하여 공정한 물배분이 가능하도록 하였으며 같은 우선순위가 설정된 경우 상류에서 하류로 분배하는 우선순위를 부여 하였다.

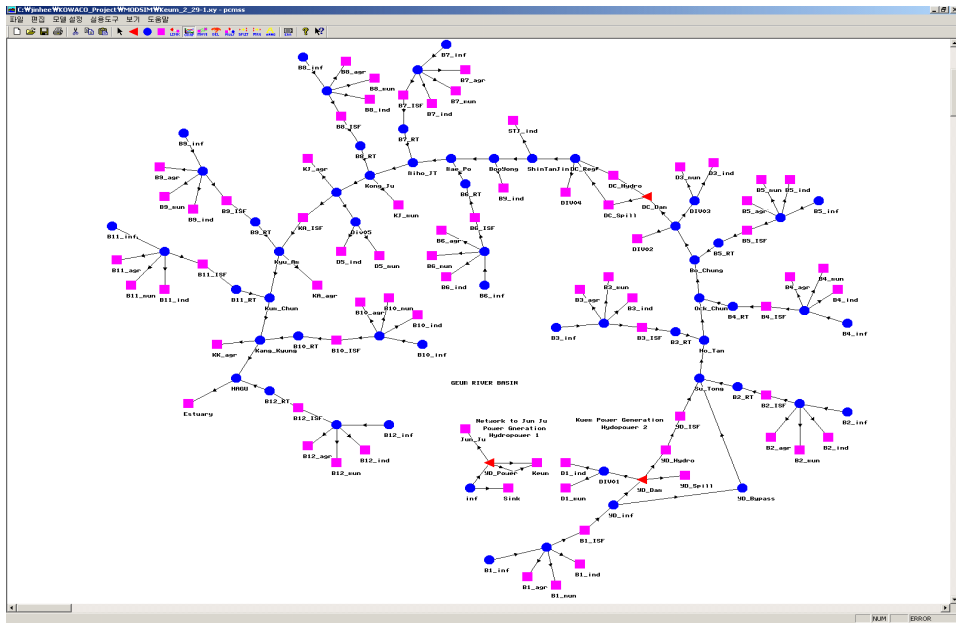


그림 3 금강유역의 네트워크 구성도

### 3.1 월별 운영률 도출

실시간 하천유역 물 관리에 필요한 월별 저수지 운영률을 도출하기 위하여 동적계획법(Dynamic Programming)을 이용한 암시적 추계학적 최적화 기법(implicit stochastic optimization)을 이용하였다. 암시적 추계학적 최적화 기법은 유량자료의 발생, 최적운영모의, 운영률 도출을 위한 추론과정으로 이루어져 있다. 본 연구에서는 먼저 유량 자료 발생을 위해 범용 수문시계열 분석 소프트웨어인 SAMS의 disaggregation모형을 이용하여 50년치 시계열 자료 10세트를 발생 시켰으며, 이를 범용 동적계획법 소프트웨어인 CSUDP를 이용하여 최적화 저수지 운영을 모의 하였다. 최적화 저수지 운영 모의의 결과를 다중회귀분석하여 월별 운영률 도출을 하였으며 운영률 예는 그림 4와 같다. 도출된 월별 용담댐-대청댐 연계 운영률을 검증하기 위하여 과거 대청댐 단독 운영 자료를 활용하여 다중 회귀분석된 운영률과 비교하였으며 용담댐에서의 전주 권 용수 및 규암 지점의 하천유지용수의 추가 공급이 가능했으며 본류의 용수수요에 대한 만족도가 증가하였다.

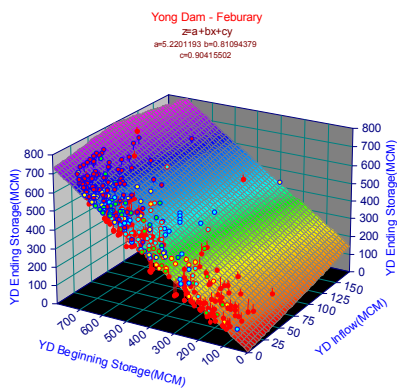


그림 4 용담댐의 월별 저수지 운영률 예

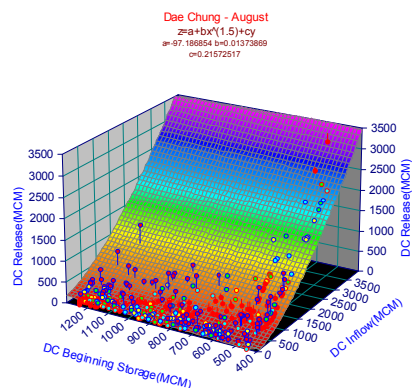


그림 5 대청댐의 월별 저수지 운영률 예

### 3.3 일별 하천유역 모의운영

앞서 도출된 월별 운영률을 이용하여 금강유역의 실시간 일별 하천유역 모의 운영을 수행하기 위하여 용담 및 대청댐의 실시간 유입량을 월별 유입량에 대입할 필요성이 생긴다. 이는 월별 저수지 운영률에 저수지 유입량 정보를 활용하여 다음 달의 방류량이나 저류량을 결정하도록 되어 있기 때문이며 이를 위해서 일별, 월별 빈도분석 결과를 대응시켜 일방류량 또는 저류량을 결정하도록 하였다. 이와 같은 루틴은 MODSIM의 닷넷 프레임 워크의 사용자 정의 코드로 정의하여 MODSIM의 운영률을 적용하였다. 아래 그림 6은 용담댐의 1993년 10월부터 1994년 9월까지의 저수량 변화를 보여주고 있으며, 그림 7은 같은기간의 저수량 변화를 과거 자료와 비교하였다.

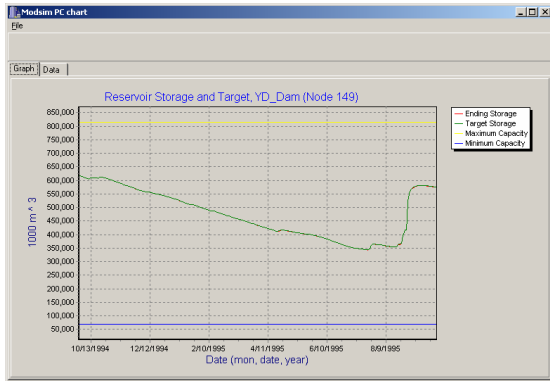


그림 6 용담댐의 일별 저수량 변화

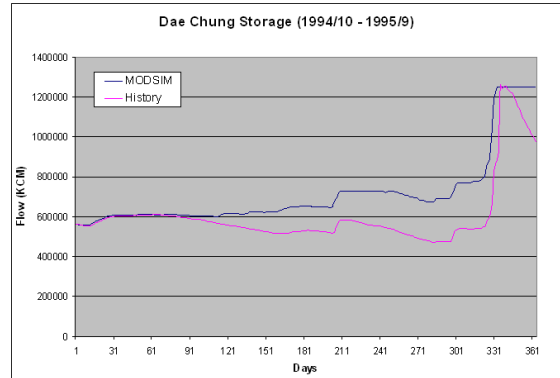


그림 7 대청댐의 일별 저수량 변화

## 4. 결론

실제 저수지를 포함한 하천유역의 물 관리 문제에 선형계획법을 활용한 네트워크 모형을 이용하여 금강유역에 모의하기 위하여 용담댐과 대청댐의 월별 연계 운영률을 도출 하였다. 도출된 결과를 이용하여 실시간 일 저수지 운영 모형을 구축하고 과거의 자료를 가지고 운영 모의하여 연계운영 효과가 달성 되었음을 확인 하였다. 그러나 본 연구에서는 용수의 우선순위는 각 용수수요점의 경제적, 정치적, 사회적인 시스템 분석과 지연주민 및 전문가의 자문을 통하여 결정하여야 하나 연구자들 간의 협의를 통하여 생활용수, 공업용수, 농업용수, 하천유지용수의 순으로 우선순위를 정하였던 것과 본류 및 지류의 현재 홍수통제소의 유수 사용 허가관련 데이터베이스의 정보를 활용하지 못한 점이 아쉬움이 따른다. 또한 갈수시의 물배분 관련하여 제도적으로 용수의 우선순위 특히 하천유지용수 문제를 해결 방법과 취수지점에 대한 철저한 감시체제의 확립이 필요하며 수자원 부족 시 개개의 수요자들의 사정 협의를 통해 자율적으로 사용량을 조정할 수 있는 조정 기구등의 제도적 장치가 필요하다고 하겠다.

## 감사의글

본 연구는 21세기 프론티어 연구개발 사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호 1-6-2)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌

1. Labadie, J. W., Fontane, D. G., Lee, J. H., and Ko, I. H.(2005). "Adaptive Decision Support System for Real-Time Operation of the Geum River Basin, Korea." EWRI 2005: Impacts of Global Climate Change.
2. Fredericks, J. W., Labadie, J. W., and Altenhofen, J. M. (1998). "Decision support system for conjunctive stream-aquifer management." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, ASCE, 124(2), 69--78.