

저수지 운영률을 고려한 최적용수배분

Optimal Water Allocation considering Reservoir Operation Rules

강재원*·유승엽**·차동훈**·고익환***

Kang, Jaewon-Rieu, Seung-yup· Cha, Donghoon-Ko, Ick Hwan

요 지

금강 유역과 같이 복잡한 하천유역 시스템의 관리를 위해서는 시스템 요소들을 통합적으로 분석할 수 있는 효과적인 의사결정지원 도구가 필요하다. K-MODSIM 모형은 단기 물관리, 장기 운영계획, 가뭄 대비계획 및 물관련 분쟁 해결을 위해 보다 개선된 유역관리 전략을 수립하기 위한 컴퓨터 기반 도구로 개발되었으며, 본 연구에서는 K-MODSIM 모형에 저수지 운영률을 반영하여 유역의 용수배분을 평가하였다.

유역 저수지군 운영 환경 및 제약조건을 반영한 네트워크를 구성한 후, 두 단계의 모형 검정을 수행하였다. 먼저 물리적 검정을 통해서 전체 대상 수계의 상하류 물수지를 검토하고, 다음 단계인 운영 측면의 검정에서 물리적으로 나타나는 상황이 댐 운영이나 제약 조건 등에 부합하는지의 여부를 검토하였다. 대청댐과 용담댐의 통합 운영을 위한 최적 운영률의 개발은 동적계획법 소프트웨어인 CSUDP를 이용하여 수행하였으며, 여기서 사용한 접근법은 음해 추계학적 동적계획법이다. 이 접근방법은 유입량 시계열을 추계학적으로 모의발생시키고, CSUDP 모형은 모의발생시킨 유입량 시계열에 대한 최적운영률을 찾기 위해 사용하며, CSUDP의 최적화 결과에 대한 통계적인 분석을 통해 월단위 운영률을 도출하였다.

K-MODSIM 모형에 저수지 운영률을 반영하여 유역의 용수배분을 평가하였다. 유역 저수지군 운영 환경 및 제약조건을 반영한 네트워크를 구성하고, 대청댐과 용담댐의 통합 운영을 위한 최적 연계 운영률을 개발하여 다음과 같은 운영 시나리오들을 개발하고 평가하였다.

- 금강수계에 대한 용담댐의 영향 평가
- 댐 연계운영시 수요량 변화에 따른 영향 평가
- 하도추적을 고려한 일별모형의 검증

개발된 운영률과 하도추적방법을 K-MODSIM 모형에서 검증하기 위해서 vb.net 스크립트 파일을 개발하여 적용하였다.

핵심용어: 저수지 운영률, 용수배분, 운영 시나리오, K-MODSIM 모형

* 정희원·한국수자원공사 수자원연구원 위촉연구원·공학박사·042-860-0431(E-mail:jwkang@kowaco.or.kr)

** 정희원·한국수자원공사 수자원연구원 연구원·공학석사·042-860-0348(E-mail:rieusy@kowaco.or.kr)

** 정희원·한국수자원공사 수자원연구원 연구원·공학석사·042-860-0344(E-mail:dhcha@kowaco.or.kr)

***정희원·한국수자원공사 수자원연구원 수자원시스템연구소장·공학박사·042-860-0340(E-mail:ihko@kowaco.or.kr)

1. 서론

대부분의 수자원 계획이나 관리는 수계내 한정된 가용 수자원을 최대한 이용하기 위해 유역 전체를 대상으로 수자원 부존량의 정확한 평가와 수요처에 합리적으로 수자원을 배분하는 문제에 직면하게 된다. 상류와 하류, 용도별 수요량, 댐수와 하천수 및 다양한 사회적 이해관계를 반영하여 수자원 배분계획을 수립하기 위해서는 시스템의 동적특성을 반영하면서 수리권 혹은 용수공급 우선 순위를 고려할 수 있는 수자원 평가 방법이 필요하다. 최적화 모형은 유역전체를 대상으로 광역체계의 수자원수급계획을 수립하는 복잡한 유역에 대해 매우 편리한 것으로 알려져 있다. 윤용남과 김태균(1993)은 저수지 운영기법을 이용한 물수지 분석방법을 외부로부터의 물공급을 고려하여 분석하였고, 이광만 등(1997)은 10개 저수지군으로 구성된 한강유역을 대상으로 분석한 바 있으며, 또한 이광만 등(1999)은 네트워크 최적화 모형을 이용하여 경북 동남부지역의 용수공급 시스템 구축에 적용하여 수리권 혹은 용수공급 우선순위를 고려한 수자원 시설물의 운영에 사용할 수 있음을 확인한 바 있다. 박명기 등(1999)은 물수지분석을 실시간으로 수행할 수 있는 프로그램을 개발하여 기존 최적화 댐군 연계운영모형에서의 시스템 방정식과 조합하여 기존의 물수지 분석과 최적화 모형과의 접목을 시도한 바 있다.

한국수자원공사는 콜로라도 주립대학교와 공동으로 기존의 MODSIM 모형(Labadie, 1995)을 개선하여 단기 물관리, 장기 운영계획, 가뭄대비 계획 및 도시, 농업, 환경측면 간의 분쟁 해결을 위해 보다 개선된 유역전략 수립에 이용할 수 있고 저수지의 일운영까지를 고려할 수 있도록 K-MODSIM 모형을 개발하였다. 본 연구에서는 금강수계를 대상으로 K-MODSIM 모형에 저수지 운영률을 반영하여 유역의 용수배분을 평가하고자 한다. 유역 저수지군 운영 환경 및 제약조건을 반영한 네트워크를 구성하고, 대청댐과 용담댐의 통합 운영을 위한 최적 연계 운영률을 개발하여 다음과 같은 운영 시나리오들을 개발하고 평가하고자 한다.

- 금강수계에 대한 용담댐의 영향 평가
- 댐 연계운영시 수요량 변화에 따른 영향 평가
- 하도추적을 고려한 일별모형의 검증

2. K-MODSIM 모형의 적용 및 분석

2.1 금강수계 네트워크의 구성

K-MODSIM 모형은 하천유역에서 각각의 시간 구간 $t=1, \dots, T$ 에 대해서 일반화된 네트워크 흐름 최적화 문제의 순차적인 해를 통해서 수자원배분 메커니즘을 모의한다. 네트워크 흐름의 질량 보존을 유지하는 범위에서, 계산기간에 걸쳐 최소 비용 네트워크 흐름 최적화 알고리즘(minimum cost network flow optimization)에 의해 선형 최적화 문제를 Lagrangian relaxation algorithm(Bertsekas and Tseng, 1994)에 의해서 문제를 풀게된다.

수계의 운영 목적을 위해 필요한 유역내의 공간적인 위치들을 파악하고, 수문학적 자료와 수요량자료의 입력을 위해 저수지, 주요 수요지점, 합류점, 그리고 기타 유역내 중요한 지점들을 포함한 금강수계 네트워크를 구성하였으며, 일단위 네트워크와 월단위 네트워크는 기본적으로는 같으나 일단위에서는 하도추적계산을 수행하기 위한 추가적인 몇 개의 노드과 자료가 더 필요하다.

소유역별 자연유량 및 수요량에 대한 정보는 유출분석 모형 연구에서 조사한 성과를 적용하였으며, 1983년 ~ 2002년 동안의 자료를 사용하였다. 수요노드에 회귀율 및 회귀지점을 설정하고, 모

형의 검보정이 이루어지는 5개의 수위관측소 지점(수통, 호탄, 옥천, 공주, 규암)에 통과유량을 설정해 주었다. 전주권 용수 공급 등 5개의 광역 상수도 공급량을 고려하였으며, 생활, 공업, 농업 용수 수요 등은 각 소유역별로 하나씩 나타내었고, 용담~대청 구간의 유지유량 5 CMS 및 공주 지점의 30 CMS의 하천 하천유지용수를 고려하였다. 용수 공급을 위한 평갈수기의 댐운영 방안은 평갈수기 댐운영 기준수위, 가뭄대비 댐운영 기법, 평갈수기 주요 운영기준 및 고려사항 등이 적용되었다. 댐 방류량은 발전과 용수공급을 함께 고려하였고, 광역 상수도 배분량도 자료를 통하여 입력하였다(한국수자원공사, 1998). 댐에서의 증발량은 실측 유량값에 고려되었다고 가정하였고, 회귀율은 생공용수는 65 %, 농업용수는 35 % (건설교통부, 한국수자원공사, 2000)로 고려하였으며, 하천 손실률은 실측 유량값에 고려되었다고 가정하였다. 모형구축시 적용한 우선순위 부여 원칙은 다음과 같다. ① 용담댐, 대청댐 관련 자료 ② 하천유지유량 (용담 직하류, 공주 수위표 지점) ③ 광역 상수도 공급량 ④ 소유역 ⑤ 생활용수 > 공업용수 > 농업용수 ⑥ 상류 > 하류

2.2 K-MODSIM 모형의 검정

하천유역의 모의모형을 적용하기 위해 필요한 검정은 수문학적 검정과 수자원 시스템 관리검정의 두 가지가 있다. 수문학적 검정은 입력자료의 집합을 개발하고 하천유역을 모의하고 모의된 결과를 공주 관측지점의 유량과 대청댐에서 저수지 저류량 수준들의 관측값들과 비교하는 과정을 따라 수행하였으며, 연계운영의 경우 규암 관측지점도 사용되었다. 대청댐 유입량, 공주, 규암 지점의 유출량에 대해 관측값과 모의값을 비교한 결과 1994년 10월부터 1995년 9월까지의 월별 자료가 가장 잘 적합한 것으로 나타났으며, 이 기간의 자료를 일별 모형의 검정에 이용하였다.

수자원 시스템 관리검정을 수행하기 위해서 대청댐의 19년동안의 과거 저류량, 방류량, 그리고 유입량 자료를 분석하여 회귀모형에 의해 월별 운영률을 도출하였다. 이렇게 개발된 과거 월별 운영률들을 K-MODSIM 모형으로 모의하였으며, 그 결과를 실제 자료와 비교하였다. 대청댐의 월말 모의 저류량과 공주지점의 모의 유량은 과거 자료와 잘 일치하였으며, 오차는 주로 이용가능한 자료의 부정확성에 의해서 야기되었다.

2.3 월별 최적 연계운영률의 개발 및 검증

Mejia와 Rousselle(1976) 모형을 공간적 disaggregation에 사용하고, Lane's Condensed 모형(Lane, 1981)을 시간적 disaggregation에 사용하여 유입량 시계열을 추계학적으로 모의발생시키고, 각각의 시계열에 대한 최적운영을 탐색하기 위한 CSUDP 모형, CSUDP 최적해들의 통계적 분석에 의해 월운영률을 도출하였다. CSUDP에서 사용된 목적함수는 물공급 부족량 공유방안에 의한 가중치를 따라 물부족량의 제곱합을 최소화하는 것과 가장 낮은 가중치를 가진 수력발전을 최대화하는 것이며, 제약조건은 상시만수위 저수용량, 최소 저수용량, 최대 터빈방류량을 반영하였다. 그리고 수력발전량은 회귀식을 사용하여 추정하였다.

2.4 월별 운영 시나리오의 적용 및 평가

(1) 금강수계에 대한 용담댐의 영향 평가

연계운영을 위한 회귀식을 개발한 후 K-MODSIM 모형을 사용하여 실적회귀 운영률과 연계운영률에 의한 모의를 함께 수행하였으며, 두 경우 모두 금강 본류에서의 수요는 대부분 만족되었으

나 불확실성이 큰 소유역들과 농업용수 수요량에서 부족이 발생한 지역들이 있었다. 연계운영의 결과가 수요를 충족시키고 시스템의 최소유량을 증가시키는 것으로 나타났다. 대청댐 유입량이 매우 감소하였음에도 규암 지점에서의 하천유지유량을 유지시키기 위해 공주 지점에서의 유량은 갈수기(1월에서 5월)에 증가되었다. 수력발전은 대청댐과 용담댐 연계운영에 의해 증가된 것으로 분석되었으며, 대청댐 단독 운영에서의 발전량은 204.42 GWh, 연계운영시에는 대청댐에서 176.11 GWh, 용담댐에서는 201.81 GWh였다.

(2) 댐 연계운영시 수요량 변화에 따른 영향 평가

수요량 증가에 대한 운영 시나리오를 검증하기 위해 2001년에 대해 추정된 현재 수요량 수준을 사용하였으며, 시스템 연계 운영의 효과는 매우 우수한 것으로 판단된다. 결과적으로 19년간의 월 단위 실적운영 자료를 기반으로 하여 과거 물수요와 이보다 증가된 “현재 수준의 수요량”을 비교한 이 시나리오에서의 결과는 과거수요와 증가된 수요 모두 만족될 수 있음을 보여주었다. 대청댐 유입량은 모든 조건에서 거의 같았다. 증가된 수요량에서는 공주 지점 유량이 4월과 10월 중 약간 감소하였으나 규암 지점에서의 목표 하천유지유량은 만족되었다. 수요 증가로 인해 대청댐 수력발전은 176.11 GWh에서 159.24 GWh로 감소하였다. 용담댐 수력발전은 두 가지 경우 모두 201.81 GWh와 201.42 GWh로 거의 같았다. 수력발전량의 감소는 소유역 내 수요의 증가에 기인하였다.

2.5 하도추적을 고려한 일별 모형 검증

일별 K-MODSIM 네트워크는 근본적으로 월별 네트워크와 동일하며, 월별 모형에서 검증된 시스템 내에서의 수요들에 대한 우선순위 구조를 일별 모형에도 사용하였다. 1994년 10월부터 1995년 9월까지의 기간이 월별 모형의 검증 분석에 기초해서 선택되었으며, 하도추적을 고려한 일단위 연계운영의 효과를 평가하였다. 일별 검증은 일별 모형에서 추적기능을 포함한 경우와 포함하지 않은 경우로 나누어서 수행되었으며, 일별 운영률은 월별 연계 운영률을 근거로 구성되었다. 대청댐 유입량과 공주 및 규암지점의 유량에 대한 관측값을 일별 모의 유량과 비교하였다(그림 1). 추적방법을 추가하면 추적을 수행하지 않는 모형에 비해서 과거 자료에 훨씬 더 근접한 결과를 나타내었다.

일별 운영률을 과거 운영으로부터 월별 회귀분석에 의해 적합된 것과 CSUDP 연계운영의 결과를 월별 회귀분석에 의해 적합된 것으로부터 개발하였다. 이 결과를 이용하여 일별 모형에서 이러한 두가지 운영률에 대한 비교를 수행하였으며, 월별 분석에서 발견되었던 것과 유사하게 분류의 수요량은 기본적으로 만족되었으며, 부족량은 주로 농업용수와 같은 불확실한 수

Integrated OP – Daily (Reservoirs)

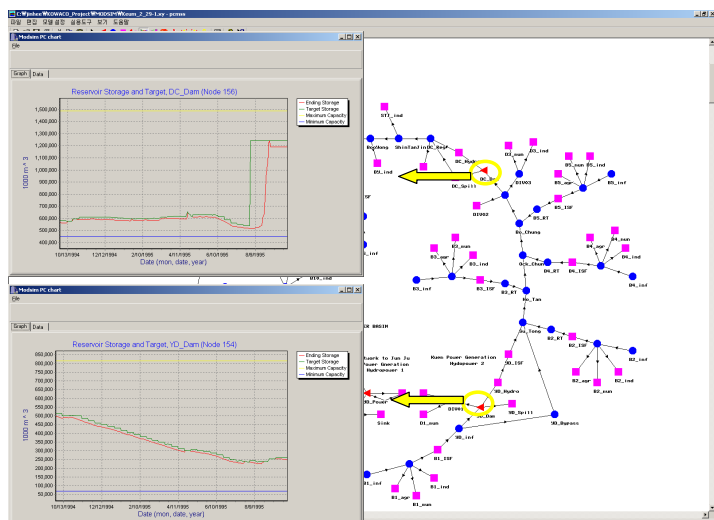


그림 1. 용담-대청댐 연계운영의 경우 일별운영 결과

요량에서 발생되었다. 이러한 결과는 매우 합리적이다. 연계운영에 의한 운영률이 과거 운영률의 추정값보다 훨씬 더 잘 수행하는 것으로 나타났다.

3. 결론

금강수계에 대해서 월단위와 일단위 네트워크를 구축하고 댐 운영률을 반영하여 용수수요의 만족도를 평가하였다. 댐 운영률은 실적운영률과 음해 동적계획법을 사용하여 대청댐과 용담댐 연계운영률을 개발하여 적용하였다. 월별모형에서는 금강수계에 대한 용담댐의 영향 평가와 댐 연계운영시 수요량 변화에 따른 영향 평가를 수행하였다. 그리고 일별모형에서는 여러 날에 걸친 시간지체를 다루기 위해서 K-MODSIM 모형에 추가된 새로운 추적 방법을 사용하여 모형을 수행한 결과 실제 관측값에 더 근접한 결과를 얻을 수 있었다. 개발된 운영률과 하도추적방법을 K-MODSIM 모형에서 검증하기 위해서 vb.net 스크립트 파일을 개발하여 적용하였다.

향후 실무에 적용하기 위해서는 한국수자원공사의 IRWMS(Integrated Real-time Water Management System)의 월간 운영 최적화 모형(SSDP)과 일간 운영 최적화 모형(CoMOM4.0)에서 제공된 자료를 이용하여 다양한 시나리오를 모의분석하는 과정이 필요할 것으로 판단된다.

4. 참고문헌

- 건설교통부, 한국수자원공사(2000). 수자원개발 장기종합계획(Water Vision 2020) 보고서.
- 박명기, 최영송, 박원출(1999). “다목적댐의 실시간 물수지 운영방안”, 한국수자원학회지, 제32권, 제3호, pp. 11-19.
- 윤용남, 김태균(1993). “외부공급을 공간적으로 고려한 물수지 분석”, 대한토목학회 논문집, 제12권 제1호, pp. 123-130.
- 이광만, 이재응(1997). “물 수지분석을 위한 대규모 저수지 시스템 해석”, 한국수자원학회 논문집, 제30권, 제6호, pp. 629-639.
- 이광만, 이재응, 심상준, 고석구(1999). “Network Optimization Model을 이용한 수자원 평가”, 한국수자원학회 논문집, 제32권, 제2호, pp. 143-152.
- 한국수자원공사(1998). 기존댐 용수공급능력 조사(금강수계).
- Bertsekas, D.P. and Tseng, P.(1994). *RELAX-IV: A faster version of the RELAX code for solving minimum cost flow problems*, Dept. of Electrical Engineering and Computer Science, M.I.T., Cambridge, Mass.
- Labadie, J.(1995). *MODSIM: Decision Support System for River Basin Management: Documentation and User Manual*, Colorado State University and U.S. Bureau of Reclamation, Fort. Collins, Colorado.
- Lane, W.L.(1981). "Corrected Parameter Estimates for Disaggregation Schemes", *Inter. Symp. On Rainfall Runoff Modeling*, Mississippi State University.
- Mejia, J. M., and Rousselle, J.(1976). "Disaggregation Models in Hydrology Revisited", *Water Resources Research*, vol. 12, no. 2, pp.185-186.