

저수지 운영을 반영한 KModSim 모형의 금강유역 적용

Application of KModSim Model with Reservoir Operation Rules in Geum River Basin

정태성*, 강신욱**, 고익환***, 황만하****

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

요 지

우리나라의 한강, 낙동강, 금강, 섬진강, 그리고 영산강 유역에는 하나 이상의 저수지가 포함되어 있어 유역통합관리를 위한 의사결정지원시스템에 있어 저수지 운영기술은 필수적인 항목 중 하나이다. 반면, 적절한 저수지 운영이 확립되어 있지 않아 저수지 운영을 고려한 유역통합관리에 어려움이 있으며, 저수지 운영을 통합관리시스템에 적용하기 위한 적용방법 또한 확립되어 있지 않은 형편이므로 이에 대한 방안이 필요하다. 본 연구에서는 실적자료를 이용하여 금강유역의 용담댐과 대청댐 운영을 구하고 수문학적상태를 이용하여 운영을 적용방법을 제안하였다. 운영을 구하기 위하여 금강유역에서 25년간의 일단위 유량자료와 저수지 운영자료를 수집하였으며, 수집된 자료를 토대로 실제 운영에 기반한 운영을 개발하였다. 기존에 개발 검증된 금강유역의 네트워크 시스템에 개발된 운영을 적용하기 위하여 수문학적상태를 사용하며 그 결과를 조절점의 실측유량 및 실적저수위, SSDP 저수위, SSDP-CoMOM 저수위를 사용한 명시적인 저수지 운영결과와 비교함으로써 개발된 운영의 적용성을 검토하였다.

핵심용어 : 저수지 운영, KModSim 모형, 수문학적 상태

1. 서 론

우리나라의 5대강 유역은 저수지를 포함하는 등 유역규모가 크고 유역간 물배분, 저수지와 지표수 연계운영, 그리고 하천환경 및 생태계를 고려하여야 하므로 시스템이 복잡한 형태를 띠고 있다. 특히, 우리나라의 경우 유역통합운영에 있어서 저수지 운영은 필수적인 항목 중 하나이다. 반면, 적절한 저수지 운영이 확립되어 있지 않아 유역통합시스템에 적용하는데 어려움이 있으며, 적용방법 또한 확립되어 있지 않은 형편이므로 이에 대한 방안이 필요하다.

본 연구에서는 실적자료를 이용하여 금강유역의 용담댐과 대청댐 운영을 구하고 수문학적상태를 이용하여 운영을 적용방법을 제안하고자 한다. 운영을 구하기 위하여 금강유역에서 25년 일단위 유량자료와 저수지 운영자료를 수집하였으며, 수집된 자료를 토대로 실제 운영에 기반한 운영을 개발하였다. 기존에 개발 검증된 금강유역의 네트워크시스템(Network System; 정태성 등, 2007; 정태성 2007)에 개발된 운영을 적용하기 위하여 수문학적상태를 사용하며 그 결과를 조절점(control points)의 실측유량 및 실적저수위, SSDP 저수위, SSDP-CoMOM 저수위를 사용한 명시적인 저수지 운영결과와 비교함으로써 개발된 운영의 적용성을 검토하고자 한다.

2. KModSim 목표계획모형

* 정회원·국립방재연구소 방재정보분석센터 연구관E-mail : tscheong@gmail.com

** 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원E-mail : sukang@kwater.or.kr

*** 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 연구위원E-mail : ihko@kwater.or.kr

**** 정회원·한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원E-mail : hwangmh@kwater.or.kr

KModSim은 계산시간($t=1,2,\dots,T$) 동안 다음 식과 같이 비용을 최소화하는 선형방정식을 풀게 된다.

$$\min \sum_{i \in A} c_i q_i \quad (1)$$

여기서 c_i 는 링크 i 에서의 비용, 가중치 혹은 단위 유량 당 우선순위, q_i 는 링크 i 에서의 유량, A 는 네트워크의 모든 링크 수이며 이때 제약조건은 다음 식과 같다.

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

$$l_{it}(\mathbf{q}) \leq q_i \leq u_{it}(\mathbf{q}) \text{ for all nodes } i \in A \quad (3)$$

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 은 네트워크상의 모든 노드 수, l_{it} 는 시간 t 일 때 링크 i 에서의 하한치, 그리고 u_{it} 는 상한치이다. 다중목적 최적화는 물리적인 O_i , I_i , N , 그리고 A 의 조건하에서 가정된 초기유입량 \mathbf{q} 에 대한 물리적 제약조건들 (l_{it} , u_{it} , 그리고 b_{it})을 만족하는 범위 내에서 \mathbf{q} 를 최소화하는 $\hat{\mathbf{q}}$ 를 구하는 것이다. KModSim모형에서는 수문학적상태를 사용하여 선형화된 일, 순, 반순, 월단위 운영율을 모의할 수 있는데, 이때, 운영율은 현재운영되고 있는 실적운영결과 혹은 최적화 모의운영결과 등으로부터 구해질 수 있다(Labadie, 1995).

모의를 위하여 비정상 수문학적 유입량 b_{it} 는 과거유입량, 예측유입량, 혹은 모의유량이 사용될 수 있으며, 이때 노드에서의 유량은 저류노드와 비저류노드에서 각각 $S_{i,t-1} + I_{it}$ 그리고 I_{it} 로 계산된다. 여기서 I_{it} 는 시간 t 일 때 유입량 그리고 S_{it} 는 시간 t 일 때의 저류량이다. 저수지노드의 경우에는 명시적으로 목표저류량(target storage)을 설정할 수 있는데, 이 경우 최적저류량 그리고 실적저류량 등을 사용할 수 있다. 더불어 기 설정된 수문학적상태 테이블을 이용하여 모형 내에서 암시적으로 목표저류량을 계산할 수도 있다. 사용자는 유역내 수리학적, 수문학적, 환경학적, 그리고 다양한 운영조건 등을 토대로 수문학적상태 테이블을 설정할 수 있으며, 필요하다면 하나의 저수지에 여러 개의 수문학적상태 테이블들을 설정할 수 있고 각각의 수문학적상태(예: 건기, 평상시, 그리고 홍수기 등)에 우선순위를 다르게 부여하여 다양한 시스템모의를 수행할 수도 있다.

Fig. 1(a)에서와 같이 각각의 수문학적상태 내에서 목표저류량이 상수라고 가정하면, 목표저류량은 다음과 같이 구해진다.

$$R_{tm} = \sum_{i \in H_m} [S_{it} + F_{it}] \quad (4)$$

여기서, H 는 모의시간단계, m (월단위 모의시 년, 일단위 모의시 주 혹은 순)에 따른 저수지노드의 집합 그리고 t 는 모의시간이다. 목표저류량을 계산하기 위해서는 각 수문학적상태의 경계치, $B_m = \beta_m W_m$ 를 설정해야만 한다. 여기서 W_m 은 각 저수지의 최대저류용량, $S_{i,max}$ 의 합이며, n 은 수문학적상태의 개수로써 KModSim에서는 최대 7개의 상태를 설정할 수 있으며, n 번째 수문학적상태의 경계치, B_{ntm} 은 W_m 이다. 본 연구에서는 저수지 운영율을 적용하기 위하여 Fig. 1(b)와 같은 수문학적상태를 도출하였다. Fig. 1(b)는 홍수기인 8월 대 청담 유입량에 따른 실적 저류량을 기반으로 구한 수문학적상태 예로써 그림에서 알 수 있듯이 본 연구에서는 저수지 저류량을 7개의 수문학적 상태로 구분하였다. 수문학적상태를 이용하면 저수지의 최적운영목표저류량 이외에 저수지 최적유입량을 예측할 수도 있는데, 싱크노드만을 갖는 용량이 0인 저수지를 시스템에 구성하는 방법으로 수문학적상태 테이블을 활용하여 저수지의 필요 유입량을 예측할 수도 있다.

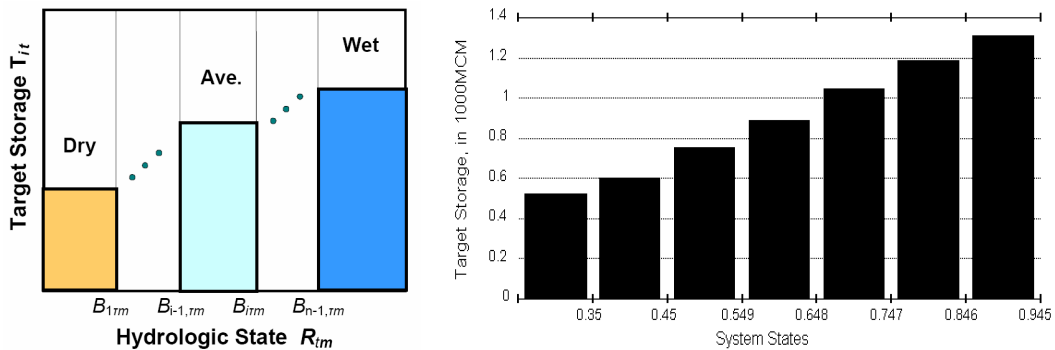


Fig. 1. Hydrologic states of KModSim decision support system applied in Geum River basin

3. 금강유역 유역통합운영시스템 (IRWMS) 개발

3.1 금강유역의 KModSim Network 구성

본 연구에서는 금강유역을 Fig. 2에 도시된 것과 같이 전체유역을 14개 소유역으로 구분하고 일 단위 및 월 단위 네트워크를 구성하였다. 대상 유역인 금강수계의 대청댐과 용담댐 두 개의 다목적댐 운영만을 고려하였다. KModSim의 물리적 검증 및 운영모의를 위하여 RRFs모형을 이용하여 구한 1983년 1월-2006년 6월 기간의 각 소유역별 유입량자료 중 2002, 10월-2007, 7월 수문자료를 이용하였다. 용담댐의 준공 및 운영이 2000년 이후이며 실제 용담댐 관련하여서는 2002년 여름이 되어서 저수량이 댐 운영에 적합할 정도가 되었으므로 그 이전에는 제대로 된 운영 사례가 없어 검증과 운영모의를 위하여 2002년 10-2007년 7월 자료를 이용하였다. 수요량은 광역상수도, 생활, 공업, 농업, 하천유지용수 등 5개 용수로 구분하고 모니터링과 각 댐 관리연보를 토대로 전주권 용수 공급을 포함한 5개의 광역 상수도 공급량, 생활 및 공업 용수 수요량 및 농업용수 이용량자료를 산정하였다. 소유역별 자연유량 정보는 각 다목적댐 관리연보 및 RRFs모형 연구에서 구해진 성과를 적용하였으며, 하천에서의 손실은 자연유량값에 기 반영된 것으로 가정하였다. 최적 월 단위 목표저류량은 SSDP 결과와 운영율을 이용하였으며, 일 단위 목표저류량은 SSDP-CoMOM 결과와 운영율을 적용하였다(과학기술부, 2007).

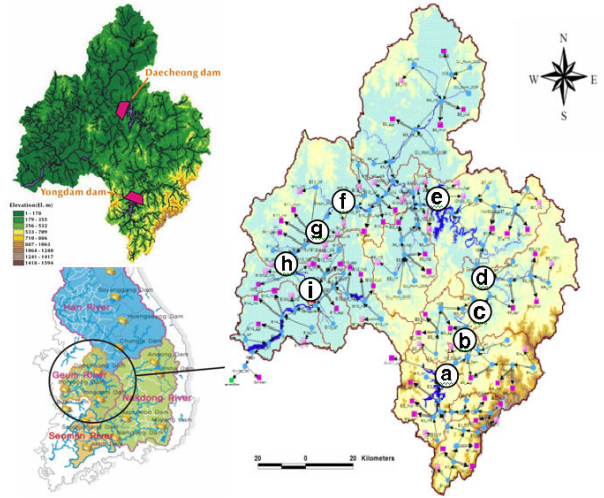


Fig. 2. Monthly and daily networks developed for the Geum River basin

3.2 용담댐과 대청댐 실적운영율

기존 저수지 운영을 분석하기 위하여 금강유역에서 수집된 용담댐의 6개년 월별 저류량자료를 상하 저류경계조건, 대청댐의 25개년 월별 저류량자료를 상하 저류경계조건, 실적저수지 운영을 비교 검토하였다. 검토 결과 용담댐과 대청댐 모두 상하 저류경계 내에서 적절히 운영되고 있음을 알 수 있다. 이러한 결과를 토대로 본 연구에서는 실적유입량 자료와 실제 저수지 운영결과를 기반으로 운영율을 개발하였다. 운영율을 구하기 위하여 본 연구에서는 금강유역에서 수집된 각 댐의 25개년 유입량자료와 저류량자료를 이용하여 다음과 같은 선형 및 비선형 운영율을 개발하였는데, 방정식의 형태는 $S_t = \alpha + \beta I_t + \gamma S_{t-1}$ 이다. 여기서 I_t 는 시간 t 일 때 유입량, S_t 는 시간 t 일 때의 저류량, 그리고 S_{t-1} 는 시간 $t-1$ 일 때의 저류량이다.

Table 1. The Regression results for the Yongdam and Daecheong Reservoir

Coef.	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Sep	Agu	Oct	Nov	Dec
Daecheong Reservoir Target Storage, $T = \alpha + \beta I + \gamma S$												
α	24.14	26.19	24.56	31.77	31.39	69.49	48.43	59.22	69.09	38.97	34.82	35.07
β	2.222	1.019	0.840	0.949	1.289	0.834	0.840	0.687	1.024	1.777	2.101	7.622
γ	0.961	0.962	0.958	0.946	0.940	0.859	0.870	0.914	0.863	0.936	0.948	0.934
Yongdam Reservoir Target Storage, $T = \alpha + \beta I + \gamma S$												
α	8.320	8.885	4.484	7.566	7.030	7.224	26.47	14.86	31.72	19.59	35.08	24.21
β	-0.03	-0.23	1.703	1.134	2.860	1.155	0.722	1.068	3.871	-0.451	-12.52	-6.851
γ	0.961	0.962	0.958	0.946	0.940	0.859	0.870	0.914	0.863	0.936	0.948	0.934

4. 운영율의 적용성 검토

본 연구에서는 개발된 운영율의 적정성을 검토하기 위하여 상, 하한 저류경계와 더불어 실적저류량 그리고 최적모의 저류량 결과를 함께 비교하였다. 본 연구에서는 월단위 최적모형으로써 SSDP모형과 월단위 운영율을 이용하여 월말 최적목표저류량을 산정하였다. 산정된 월말 SSDP 최적목표저류량을 CoMOM 일단위 목표저류량 산정을 위한 입력 값으로 사용하여 일별 최적목표저류량을 산정하였다. 일단위 모의를 위하여 KModsim에서는 일단위 운영율을 이용하였으며, 보다 정확한 운영모의를 위하여 하도추적과 Backrouting방법(정태성, 2007)을 적용하였다.

SSDP-CoMOM 목표저류량을 사용하는 경우와 운영율을 이용하여 목표저류량을 산정하는 경우 모두 용담댐에서 구한 실적저류량에 비해 작은 저류량 구간이 존재하는 반면, 운영율을 목표저류량으로 설정하고 모의를 수행한 경우 대부분 실적저류량에 비해 큰 저류양상을 보이는 것으로 나타났다. SSDP-CoMOM 목표저류량을 사용하는 경우와 운영율을 이용하여 목표저류량을 산정하는 경우 모두 대청댐에서 구한 실적저류량에 비해 큰 저류양상을 보이는 것으로 나타났다. SSDP-CoMOM 목표저류량을 사용하는 경우의 모의 저류량은 상한기준선을 초과하는 큰 저류량 구간이 나타나는 반면 실적목표저류량과 운영율을 이용하여 모의를 수행한 모의저류량은 대부분 대청댐 저류량 상하한 기준선 내에서 운영이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 모의 기간동안 SSDP-CoMOM 목표저류량을 사용하는 경우 평균저류량은 9.4%증가, 여수로방류량은 8.8%감소, 발전방류량은 12.3%감소, 그리고 발전량은 6.7% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 운영율을 이용하여 목표저류량을 산정하는 경우 평균저류량은 13.1%증가, 여수로방류량은 23.3%감소, 발전방류량은 10.8%감소, 그리고 발전량은 3.0% 정도 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 3). 일단위 모의 결과를 실적치와 비교한 결과 전체적으로 SSDP-CoMOM 목표저류량을 사용하는 경우에 비해 운영율을 이용하여 목표저류량을 산정하는 경우에 보다 효율적인 운영이 이루어지고 있음을 보여준다. 본 연구결과 실무자가 저수지운영 혹은 유역단위 통합운영을 위하여 최적화 모형을 현실에서 활용하고자 한다면, 실적자료를 이용한 저수지 운영율과 수문학적상태 방법을 활용하여 최적 모의운영을 수행할 수 있다. 더불어 유역간 분쟁 혹은 이해당사자간의 분쟁 해결 그리고 의사결정이 요구되는 다양한 시나리오 개발에 본 연구방법이 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

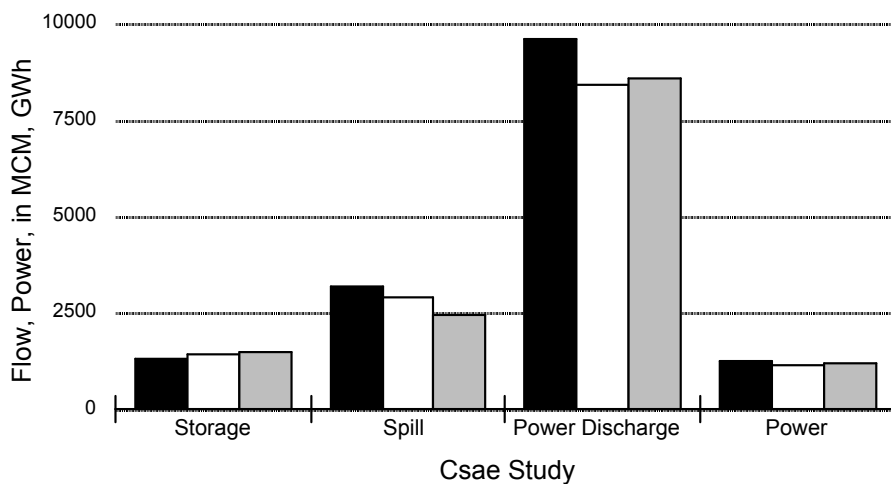


Fig. 3. Comparisons of Simulated Results with Measured Data in Which ■: Actual Storage Target; □: SSDP-CoMOM Storage Target; ▒: Operation Rule

5. 결론

유역통합관리는 유역 전체 혹은 유역간 가용 수자원을 최대한 이용하기 위해 유역 간 수자원을 정확히 조사 및 평가하고 수요처 및 경관, 생태, 수질보호를 위해 하천유역에 합리적으로 배분하는 문제에 직면하게

된다. 특히, 최근 유역관리는 유역관리시스템이 매우 복잡할 뿐만 아니라 광대한 관계로 수자원 이용의 합리화 혹은 최적화가 쉽지 않은 실정이다. 또한 행정적, 법적 제약조건이나 수리권 혹은 이해당사자가 분쟁 등을 합리적으로 고려해야 하며, 지표수-지하수 및 수량-수질 연계, 하천 경관 및 생태계보호를 위한 환경유량 등 물의 종합적 관리 및 운영 방안이 필요하다. 복잡해지는 유역의 상황을 고려하여 적용의 편리성을 증진하고, 수자원계획의 다양한 조건을 반영해야한다는 점을 고려한다면 네트워크 최적화 모형을 이용하는 것이 바람직하다. 그러나 연구자와 실무자간의 인식차이로 인해 최적화 모형의 현실 활용이 어려워 본 연구에서는 최적화 모형의 현실 활용 기회를 높이기 위한 방안으로 실적자료를 이용하여 금강유역의 용담댐과 대청댐 운영율을 구하고 수문학적상태를 이용하여 운영율을 적용하는 방법을 제안하였다. 본 연구에서는 실적 운영율과 저류량 자료를 토대로 선형 운영율을 산정하였으며 이들 운영율을 적용하기 위하여 KModSim모형의 수문학적상태방법을 이용하여 모의를 수행하였다. 일단위 및 월단위 모의 결과를 실적치와 비교한 결과 전체적으로 SSDP-CoMOM 목표저류량을 사용하는 경우에 비해 운영율을 이용하여 목표저류량을 산정하는 경우보다 효율적인 운영이 이루어지고 있음을 알 수 있었다. 따라서 KModSim의 수문학적 단계방법을 사용한다면, 우리나라에서 관행적으로 적용해온 물수지 분석 방법을 개선할 수 있을 뿐만 아니라 최적 통합수자원운영모의에 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호: 1-6-3)에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- 과학기술부 (2007). **유역 물관리 운영 기술 개발**.
- 정태성, 강신욱, 고익환, 황만하 (2007). “금강유역에서의 KModSim을 이용한 의사결정지원시스템 개발 및 적용.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권 제3B호, pp. 319-329.
- 정태성 (2007). “Backrouting 방법의 개발 및 적용성 검토.” **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제27권, 제 4B호, pp. 423-430.
- Labadie, J. (1995). *River Basin Model for Water Rights Planning, MODSIM: Technical Manual*. Department of Civil Engineering, Colorado State University, Ft. Collins, CO.