

# 저수지운영 모형을 이용한 댐군 연계운영 효과 분석

## Effects of Multi-Reservoir Operating System Using Reservoir Operation Models

황만하\*, 강신욱\*\*, 이배성\*\*\*, 고익환\*\*\*\*

Man Ha Hawng, Shin Uk Kang, Bae Sung Lee, Ick Hwan Ko

### 요 지

장기 수자원계획시 댐군의 연계운영을 위한 물수지분석 모형으로 HEC-5 모형과 K-ModSim 모형을 선정하고, 이에 대한 댐군의 연계운영 효과를 비교·평가를 수행하였다. K-ModSim 모형은 범용 우선순위 목적선형최적화 모형으로, 조절점 및 저수지조작에 대한 우선순위를 지정할 수 있는 반면, HEC-5 모형은 목적별 저수지 조작의 우선순위가 지정되며, 등가저수지 개념을 사용하여 방류 우선순위를 결정하도록 되어있다. 이와 같은 연계운영 방식의 차이는 적정한 시기에 조절점에서의 물부족이 발생하는지 여부를 결정짓는 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 가뭄발생 상황에 대한 각 모형의 연계운영효과를 비교·분석함으로써 급속히 변화하고 있는 수자원 이용환경에서 보다 합리적인 댐군의 연계운영 방안을 제시하고자 한다.

핵심용어 : 저수지운영 모형, 댐군 연계운영, K-ModSim, HEC-5

### 1. 서론

최근 엘니뇨, 라니냐 등 기상이변에 의한 홍수와 가뭄의 영향이 심화되고 있고, 도시화·산업화로 인한 물 부족 발생이 전망되며, 수변환경 개선을 위한 하천유지용수량 증가가 요청되는 등 수자원 이용환경이 급속히 변화되고 있다. 그러나 댐 개발 적지 감소 및 수몰지 보상비 상승 등으로 인한 댐 개발단가 상승과 최근에 전 세계적으로 확산되고 있는 개발위주의 논리에 반대하여 지속가능한 개발을 주장하는 환경 관련 시민단체의 논리를 포용하는 새로운 수자원관리 개념이 설득력을 갖게 되었다. 따라서 이제부터는 수자원관리 개념을 공급위주의 관리로부터 수요위주 관리로 전환하고, 기존 댐의 운영방법의 개선을 통하여 가용자원을 최대한 활용하여야만 한다.

이에 대한 여러 가지 대책 중 하나가 동일 수계내 댐군의 연계운영을 통하여 기존 수자원 시설의 이용 효율을 극대화하는 방안이다. 연계 운영이라 함은 수계내에서 각기 다른 목적으로 분리 운영되고 있는 모든 수자원시스템의 통합운영을 의미한다. 국내에서는 다목적댐을 포함한 주요 용수공급용 댐의 최적 연계운영방안에 대한 구체적인 기술개발 노력이 진행 중에 있다. Hirsh et al.(1977)은 연계운영을 통한 상승효과가 매우 크다는 것을 수치실험을 통해 밝힌 바 있고, 김승권 등(2005)은 낙동강유역을 대상으로 댐군의 최적 연계운영을 통한 시너지효과를 분석하였으며, 이재웅(2004)은 금강유역 다목적댐의 연계운영을 위한 최적 운영율을 개발한 바 있다.

본 연구에서는 장기 수자원계획시 댐군의 연계운영을 위한 물수지분석 모형으로 HEC-5 모형과 K-ModSim 모형을 선정하고, 이에 대한 댐군의 연계운영 효과를 비교 및 평가를 수행하고자 한다. K-ModSim 모형은 수자원배분에 관련된 물리적, 수문학적, 제도적, 그리고 행정적인 요구들을 동시에 만족하도록 디자인된 범용 우선순위 목적 선형최적화 모형으로, 조절점 및 저수지조작에 대한 우선순위를 지정할 수 있을 뿐만 아니라

\* 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 수자원환경연구소 수석연구원 · E-mail : mhhwang@kwater.or.kr  
\*\* 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 수자원환경연구소 연구원 · E-mail : sukang@kwater.or.kr  
\*\*\* 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 수자원환경연구소 공동연구원 · E-mail : baesung@hannam.ac.kr  
\*\*\*\* 정회원 · 한국수자원공사 수자원연구원 수자원환경연구소 연구위원 · E-mail : ihko@kwater.or.kr

water balancing 방법을 통하여 저수지별로 용수공급 분담률을 지정할 수 있어 보다 현실에 가까운 연계운영이 가능하다. 반면 다목적저수지 운영에 관한 대표적 모형인 HEC-5 모형에서는 목적별 저수지 조작의 우선순위가 지정되며, 등가저수지 개념을 사용하여 병렬저수지 혹은 직렬저수지가 있는 하부시스템 사이의 방류 우선순위를 결정하도록 되어있다. 이와 같은 연계운영 방식의 차이는 적절한 시기에 조절점에서의 물부족이 발생하는지 여부를 결정짓는 매우 중요한 요소이다. 따라서 본 연구에서는 가뭄발생 상황에 대한 각 모형의 연계운영효과를 비교분석함으로써 급속히 변화하고 있는 수자원 이용환경에서 보다 합리적인 댐군의 연계운영 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 연계운영효과 분석 모형

### 2.1 K-ModSim 모형의 연계운영 방식

K-ModSim 모형(한국수자원공사, 2007)은 다양한 흐름조건 하에서 모의가 가능하며, 지표수-지하수 연계를 위하여 다양한 모형과 GIS자료 및 데이터베이스를 활용하여 계산할 수 있다. 주요 입력자료는 저수지 침투, 증발, 발전, 댐운영, 수로손실, 홍수추적, 펌핑, 회귀수, 펌핑에 기인한 저류정보, 그리고 지하수흐름에 기인한 저류정보 등이다. K-ModSim 모형을 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. K-ModSim 모형의 최적화는 우선순위를 고려한 네트워크 흐름의 최적화를 의미하는 것으로서 계산시간 ( $t=1, \dots, T$ ) 동안 식 (1)에 제시된 선형방정식을 풀게 된다. 그리고 노드의 제약조건은 식 (2) 및 식 (3)과 같다.

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

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

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

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 node  $i$ 에서 시작되는 모든 링크(예: 유출링크),  $I_i$ 는 node  $i$ 에서 끝나는 모든 링크(예: 유입링크),  $b$ 는 시간  $t$ 일 때 node  $i$ 의 유입(양수) 혹은 수요(음수),  $l_{\ell}$ 는 시간  $t$ 일 때 링크  $\ell$ 에서의 하한치, 그리고  $u_{\ell}$ 는 시간  $t$ 일 때 링크  $\ell$ 에서의 상한치이다. 네트워크 흐름구조와 특성 등은  $O_i$ ,  $I_i$ ,  $N$ , 그리고 링크 혹은 아크를 위한 아크변수들  $[l_{\ell}, u_{\ell}, c_{\ell}]$ 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, 하도손실, 유지유량, 그리고 수리권 혹은 어떠한 우선순위에도 지배를 받지 않는 수요요구량을 만족하기 위한 흐름 등의 함수이다.

K-ModSim 모형의 댐간 연계운영은 그림 1과 같이 water balancing 기능을 이용하여 구현하도록 되어있다. 이와 같은 운영방식은 각 저수지의 유효저수용량을 여러 개의 레이어로 구성한 후, 하류수요가 있을 때 순차적으로 방류하도록 우선순위를 구성하는 방식이다. 만약 하류에

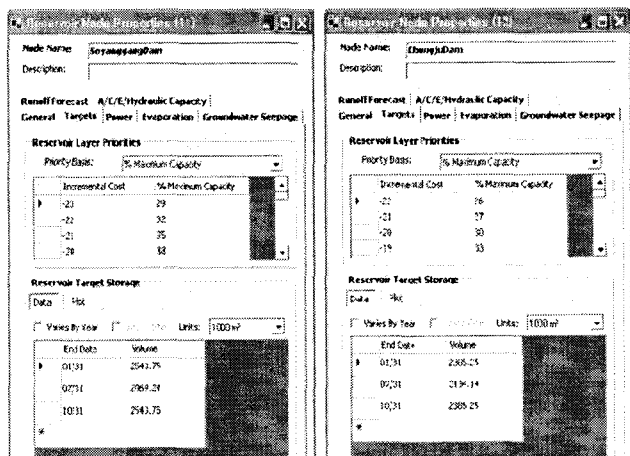


그림 1. water balancing에 의한 댐간 연계방법

100단위의 수요가 있고, 상류에 유효저수용량이 각각 100과 1,000인 저수지 A, B의 레이어를 10개로 나누었다고 가정하면, 우선순위가 높은 A 저수지에서 10을 방류하고 나머지 90은 B 저수지에서 방류하게 된다. 이 상과 같은 연계운영 방법을 사용한다면, 하류수요에 대해 상류저수지에서 동일비율로 방류할 수 있다.

## 2.2 HEC-5 모형의 연계운영 방식

다목적저수지 운영에 관한 대표적 모형인 HEC-5 모형은 여러 개의 저수지와 조절점으로 구성된 저수지 시스템의 특성 및 문제점에 따라 부과되는 각종 제약 조건하에서 주운, 수력발전, 용수공급 등의 이수목적과 홍수조절 등 치수목적의 요구를 최대한 충족시킴으로써 수자원 활용전반에 걸친 저수지 시스템운영을 최적화하는 모형이다. HEC-5 모형에서는 방류 우선 순위 결정시 저수지의 등가화 개념이 이용되며, 시스템내의 각 저수지수위는 저수량을 가중치로 결정한다.

어떤 유역내 다음 그림 2와 같이 저수지 군이 연결되어있고, 제1, 2, 3저수지의 전 시간대의 저수량 및 수위가 각각 35, 12.5, 3 및 4.5, 3.5, 2.5 이라 한다면, 조절점인 제3저수지의 목표 저수위를 만족하기 위해서는 제1, 2저수지에서 방류하는 것이 바람직하며, 저수지의 등가 저수량은 50.5이고, 등가 지침수위는 3.97이 된다. HEC-5 모형에서 사용하는 방류기준은 상류저수지의 지침수위가 하류저수지 또는 등가 지침수위보다 높을 경우 상류저수지에서 방류한다. 따라서 제1저수지의 지침수위가 등가 지침수위보다 높고, 2저수지의 지침수위는 등가 지침수위보다 낮다면, 방류는 제2저수지가 아닌 제1저수지로부터 이루어질 것이다. 이러한 방류 기준은 상류 저수지에 저류된 평균 저수 총량이 하류 저수지에 저수된 평균 저수총량 보다 클 경우에만 최상류 저수지에서 먼저 방류하게 하는 방류 기준으로서 상-하류 저수지 간의 평형을 고려한 방류 규칙이다. 그러나 규정된 물리적 또는 그 외의 제약 조건(하류지점의 유지유량 등)이 있을 경우는 그것에 따른다.

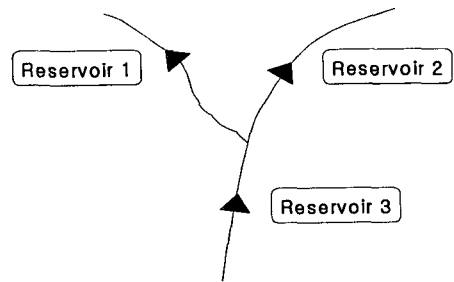


그림 2. 등가 저수지의 예

## 3. 연구대상유역 선정 및 시나리오 구성

본 연구에서는 모형별 댐군의 연계운영 효과를 비교·평가하기 위해 연구대상유역으로 한강유역을 선정하였으며, 그림 3과 같은 네트워크를 구성하였다. 그림 3에서 보는 것과 같이 연계운영 대상 댐으로는 북한강유역의 소양강댐과 남한강유역의 충주댐이며, 하류 조절점으로는 팔당댐이다.

각 댐별 초기 저수위는 2006년 12월말 기준수위 (소양강댐 : EL.173.7m, 충주댐 : EL.124.7m, 팔당댐 : EL.25.1m)를 입력하였으며, 각 댐별 용수이용 구간은 저수위 ~ 상시만수위 구간이고, 연계운영 모의시 운영조건으로는 하류 조절점인 팔당댐의 용수공급계획량을 최우선적으로 만족하되, 각 댐별 용수공급계획량을 동시에 만족하도록 하였다. 이때 각 댐별 용수수요량 및 하류 하천의 유지유량 자료는 다목적댐 운영 실무편람(한국수자원공사, 2005)의 월별 용수공급 계획량자료를 이용하였다.

또한 연계운영에 따른 효과를 분석하기 위해 다음 표 1과 같이 극한 가뭄상황에 대한 월유입 시나리오를 구성하여 이를 분석하였다. 표 1의 극한 가뭄상황에 대한 월유입량 자료는 우리나라(서울지역)에서 기상관측을 시작한 이래 가장 극심한 가뭄이 발생한 해인 1901년의 강수(년간 총강우량 : 368mm, 우리나라 년평균 강수량(1,284mm)의 29%)가 다시 발생한다고 가정했을 경우에 해당되는 월유입량 자료이다.

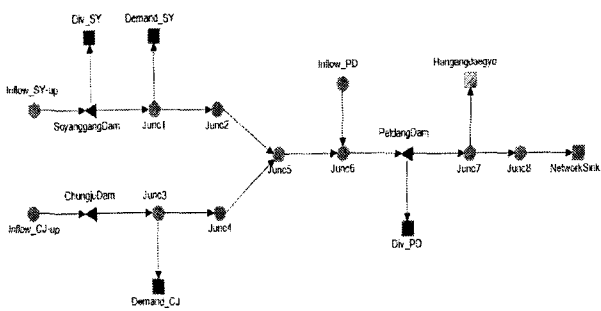


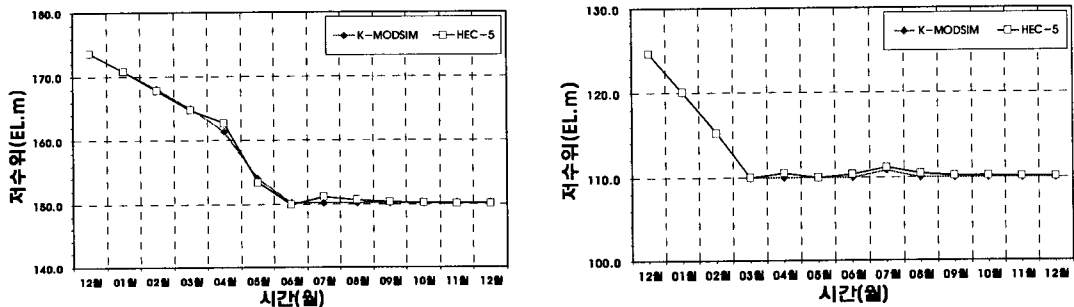
그림 3. 한강수계 네트워크 구성

표 1. 각 댐별 월유입 시나리오 구성(극한 가뭄상황)

구분	월유입량(cms)											
	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
소양강댐	1.0	1.1	5.1	17.7	4.8	9.3	30.0	24.4	14.1	7.0	4.1	2.8
충주댐	9.5	10.4	17.2	42.0	16.8	32.9	124.9	105.7	40.0	24.5	18.5	13.9
팔당댐	2.8	8.1	2.3	16.3	19.6	23.8	73.6	57.7	16.5	23.9	11.3	0.8

#### 4. 극한 가뭄상황에 대한 연계운영효과 분석

본 연구에서는 HEC-5 모형과 K-ModSim 모형을 이용하여 월유입 시나리오에 대한 한강수계 댐군의 연계운영모의를 실시하였으며, 모의결과 연계운영 대상 댐(소양강댐, 충주댐)의 저수위변화는 그림 4와 같다. 그림 4에서 보는 것과 같이 각 댐별 저수위를 두 모형 모두 근사하게 모의하는 것으로 나타났으나, 일부 기간에서는 HEC-5 모형을 이용한 모의 결과가 K-ModSim 모형의 모의결과에 비해 다소 높은 것으로 나타났다. 이에 대한 원인을 보다 명확히 파악함은 물론 모형별 연계운영 효과를 분석하기 위해 각 댐별 월별 용수 부족량을 산정하였으며, 분석결과는 다음 그림 5 및 표 2와 같다.



(a) 소양강댐 (b) 충주댐  
그림 4. 극한 가뭄상황에 대한 각 댐별 저수위 변화

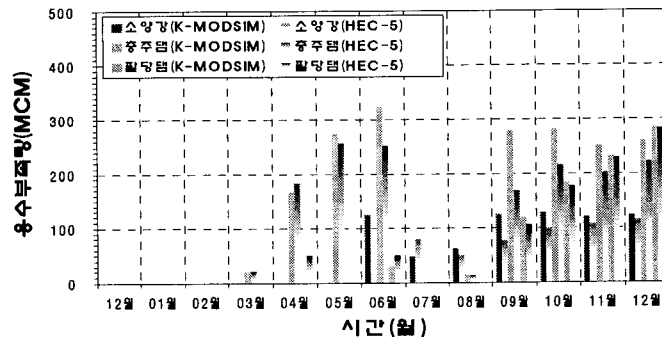


그림 5. 극한 가뭄상황에 대한 월별 용수부족량 산정결과

그림 5 및 표 2에서 보는 것과 같이 하류 조절점인 팔당댐을 기준으로 볼 때 용수부족 총량은 K-ModSim 모형의 경우 852.9 MCM, HEC-5 모형은 896.4 MCM의 용수가 부족한 것으로 나타났으며, HEC-5 모형에서는 4월에 49.3 MCM의 용수부족이 추가적으로 발생하였다. 특히 HEC-5 모형의 경우 4월과 6월의 경우 제1의 우선만족 조건인 팔당댐에서 용수부족이 발생하였음에도 불구하고 상류에 위치한 소양강댐에서는 용수부족이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 HEC-5 모형의 경우 진정한 의미에서 연계운영 효과를 기대하기란 사실

상 어려운 것을 의미한다. 이와 같이 HEC-5 모형에서 연계운영효과가 제대로 발휘되지 못하는 것은 등가저수지 개념을 이용하여 용량배분을 하고, 각 조절점에 대한 우선순위를 인위적으로 부여하지 못하기 때문이다. 반면 K-ModSim 모형은 하류수요에 대해 상류저수지에서 동일비율로 방류할 수 있을 뿐만 아니라, 각 조절점에 대한 우선순위를 인위적으로 부여할 수 있어 보다 현실에 가까운 연계운영이 가능하였다.

표 2. 극한 가뭄상황에 대한 댐별 용수부족량 산정결과

월	소양강댐			충주댐			팔당댐		
	K-MODSIM (MCM)	HEC-5 (MCM)	오차 (MCM)	K-MODSIM (MCM)	HEC-5 (MCM)	오차 (MCM)	K-MODSIM (MCM)	HEC-5 (MCM)	오차 (MCM)
01월	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
02월	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
03월	0.0	0.0	0.0	22.7	22.7	0.0	0.0	0.0	0.0
04월	0.0	0.0	0.0	166.7	183.5	-16.8	0.0	49.3	-49.3
05월	0.0	0.0	0.0	273.7	256.9	16.8	0.0	0.0	0.0
06월	124.9	0.0	124.9	324.5	252.4	72.1	30.1	49.8	-19.7
07월	48.8	79.0	-30.3	0.0	1.9	-1.9	0.0	0.0	0.0
08월	63.8	49.7	14.0	14.7	13.4	1.3	0.0	0.0	0.0
09월	124.9	75.9	49.0	279.4	168.4	111.0	120.3	105.8	14.5
10월	127.0	100.3	26.6	281.8	215.0	66.8	183.6	178.0	5.6
11월	119.8	107.5	12.3	251.9	202.4	49.6	233.7	230.2	3.4
12월	123.7	115.0	8.8	260.3	222.4	38.0	285.2	283.3	1.9

## 5. 결론

본 연구에서는 급속히 변화하고 있는 수자원 이용환경에서 보다 합리적인 댐군의 연계운영 방안을 제시하고자 댐군의 연계운영을 위한 물수지분석 모형으로 HEC-5 모형과 K-ModSim 모형을 선정하고, 이에 대한 연계운영 효과를 비교평가하였다. 연구대상 유역으로는 한강유역을 선정하였으며, 연계운영에 따른 가치적인 효과를 분석하기 위해 극한 가뭄발생 상황에 대한 월유입 시나리오를 작성 이를 분석하였다. K-ModSim 모형은 하류 조절점인 팔당댐을 기준으로 연간 총 852.9 MCM의 용수부족이 발생하였고, HEC-5 모형은 896.4 MCM의 용수가 부족한 것으로 나타났으며, 특히 HEC-5 모형의 경우 4월과 6월의 경우 제1의 우선만족 조건인 팔당댐에서 용수부족이 발생하였음에도 불구하고 상류에 위치한 소양강댐에서는 용수부족이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 따라서 K-ModSim 모형의 연계운영 효과가 HEC-5 모형에 비해 월등한 것으로 분석되었고, 조절점 및 저수지조작에 대한 우선순위를 지정할 수 있을 뿐만 아니라 water balancing 방법을 통하여 저수지별로 용수공급 분담률을 지정할 수 있는 K-ModSim 모형을 이용한다면 보다 현실에 가까운 연계운영이 가능할 것으로 판단된다.

## 참고 문헌

1. 김승권, 이용대, 박명기(2005). 낙동강 수계 실시간 댐군 최적 연계운영의 시너지 효과, 2005년도 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 289-293.
2. 이계웅(2004). 다목적댐의 연계운영을 위한 최적 운영률 개발, 한국수자원학회 논문집, 제36권, 제6호, pp. 487-497.
3. 한국수자원공사(2005). 다목적댐 운영 실무편람.
4. 한국수자원공사(2007). 유역 물 관리 운영 기술 개발.
5. Hirsh, R. M., Cohon, J. L., and ReVelle, C. S.(1977). Gains from Joint Operation of Multiple Reservoir Systems, Water Resources Research.