

Reservoir Balancing 방법을 이용한 연계운영효과 비교

Comparison of a Joint Operation effect between Dams using Reservoir Balancing Method

강신욱*, 신현호**, 황만하***, 이상진****
Shin Uk Kang, Hyeon Ho Shin, Man Ha Hawng, Sang Jin Lee

요 지

유역 내 수문학적 조건은 변화하게 되고 이러한 변화에 대처해야만 하는 유역관리자는 적절한 수자원의 운용에 어려움을 느끼게 된다. 이러한 수문학적 조건 변화는 갑작스런 인구증가, 산업발전 등에 의해서도 발생될 수 있으며, 이 경우 용수공급, 수력발전, 그리고 환경용수 등 서로 상충되는 이해관계를 조정하여 물이용의 효율성 극대화하는 범 유역 단위의 수자원 평가 및 배분이 고려되어야 한다. 더불어 정치적, 경제적, 그리고 환경목적에 부합된 새로운 수자원 개발을 위해서도 지속적인 수자원 통합관리를 위한 의사결정지원시스템은 매우 중요하다. 복잡하고 다양한 요구를 만족하기 위해서는 유역관리 대상을 통합 관리할 수 있는 효과적인 운영 도구가 필요하다. 본 연구에서는 장기 수자원계획시 댐군의 연계운영을 위한 물수지분석 모형으로 KModSim 모형을 선정하고, 이에 대한 댐군의 연계운영 효과를 비교 및 평가를 수행하고자 한다. KModSim 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 reservoir balancing 방법을 통하여 저수지별로 용수공급 분담률을 지정할 수 있어 보다 현실에 가까운 연계운영이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 의사결정 지원 모형들 중 네트워크 알고리즘을 이용하는 KModSim 모형을 이용하여 낙동강권역에 대한 수자원평가지 댐간 연계운영을 하였을 경우와 하지 않았을 경우를 모두 수행하여 비교·분석함으로써 급속히 변화하고 있는 수자원 이용환경에서 보다 합리적인 댐군의 연계운영 방안을 제시하고자 한다.

핵심용어 : reservoir balancing, 연계운영, 수자원평가

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 대비책 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

* 정회원.한국수자원공사 수자원연구원 선임연구원.E-mail : sukang@kwater.or.kr
** 정회원.한국수자원공사 수자원연구원 공동연구원.E-mail : johnnydepp@kwater.or.kr
*** 정회원.한국수자원공사 수자원연구원 수석연구원.E-mail : mhhwang@kwater.or.kr
**** 정회원.한국수자원공사 수자원연구원 책임연구원.E-mail : sjlee@kwater.or.kr

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 운영을 개발한 바 있다.

본 연구에서는 장기 수자원계획시 댐군의 연계운영을 위한 물수지분석 모형으로 KModSim 모형을 선정하고, 이에 대한 댐군의 연계운영 효과를 비교 및 평가를 수행하고자 한다. KModSim 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 reservoir balancing 방법을 통하여 저수지별로 용수공급 분담률을 지정할 수 있어 보다 현실에 가까운 연계운영이 가능하다. 따라서 본 연구에서는 의사결정 지원 모형들 중 네트워크 알고리즘을 이용하는 KModSim 모형을 이용하여 낙동강권역에 대한 수자원평가시 댐간 연계운영을 하였을 경우와 하지 않았을 경우를 모두 수행하여 비교·분석함으로써 급속히 변화하고 있는 수자원 이용환경에서 보다 합리적인 댐군의 연계운영 방안을 제시하고자 한다.

2. KModSim 모형의 연계운영 방식

KModSim 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, 댐운영율, 수로손실, 홍수추적, 펌핑, 회귀수, 펌핑에 기인한 저류정보, 그리고 지하수흐름에 기인한 저류정보 등이다. KModSim 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. KModSim 모형의 최적화는 우선순위를 고려한 네트워크 흐름의 최적화를 의미하는 것으로써 계산시간 ($t=1, \dots, T$) 동안 식 (1)에 제시된 선형방정식을 풀게 된다. 그리고 노드의 제약 조건은 식 (2) 및 식 (3)과 같다.

$$\min \sum_{\ell \in A} c_{\ell} q_{\ell} \tag{1}$$

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

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

여기서 c_{ℓ} 은 링크 ℓ 에서의 비용, 가중치 혹은 단위 유량당 우선순위, q_{ℓ} 은 링크 ℓ 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_{ℓ} 는 시간 t 일 때 링크 ℓ 에서의 하한치, 그리고 u_{ℓ} 는 시간 t 일 때 링크 ℓ 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 가

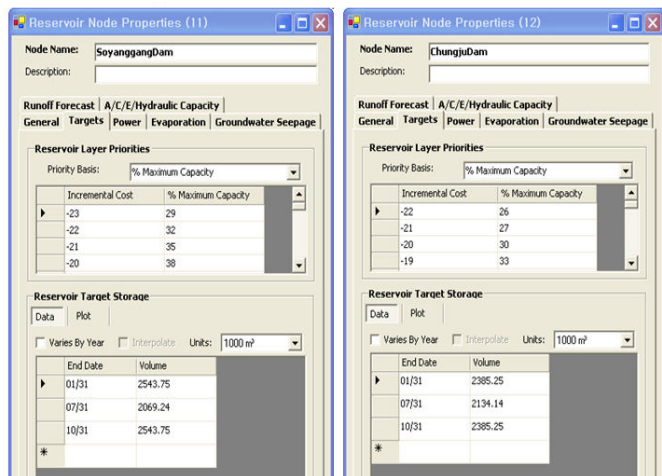


그림 1. Reservoir balancing에 의한 댐간 연계방법

지고 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.

KModSim 모형의 댐간 연계운영은 그림 1과 같이 Reservoir balancing 기능을 이용하여 구현하도록 되어 있다. 이와 같은 운영방식은 각 저수지의 유효저수용량을 여러 개의 레이어로 구성한 후, 하류수요가 있을 때 순차적으로 방류하도록 우선순위를 구성하는 방식이다. 만약 하류에 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. 이상과 같은 연계운영 방법을 사용하면, 하류수요에 대해 상류저수지에서 동일비율로 방류할 수 있다.

3. 모형의 입력자료

3.1 수요량

물수지 계산의 기본 자료에는 수요량, 회귀율, 물이동량, 수급 우선순위, 수요패턴, 댐 자료 등이 있다. 수요량은 수자원장기종합계획의 자료와 같이 생활, 공업, 농업, 하천유지용수 등 4개 목적으로 구분하고 물수지를 계산한다. 본 연구를 위하여 생활, 공업, 농업용수는 2011년도 기준 수요량만을 사용하였다. 농업용수는 관개전, 비관개전, 관개답, 비관개답, 축산용수로 구성된다. 생활, 공업, 농업용수는 반순 단위 수요패턴을 적용하여 산정된 값을 사용하였다. 사용한 수요량 자료는 월별로 그림 2와 같다. 전체수요량 중 생활용수는 12.25%, 공업용수는 6.14%, 농업용수는 81.6%이다. 전체 수요량 중 4월~9월의 농업용수가 대부분을 차지한다.

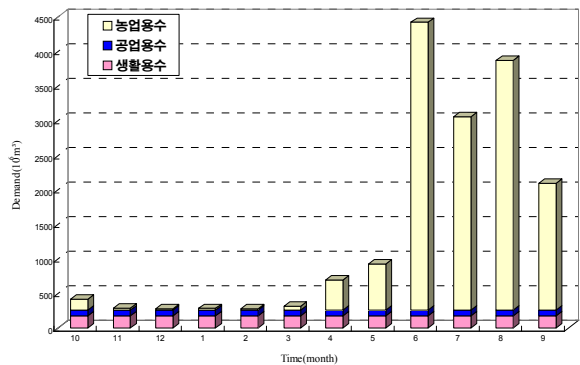


그림 2 낙동강권역의 월별 생활, 공업, 농업용수

3.2 공급량

본 연구에서는 현 상황에서 낙동강권역의 장기간의 자연 유출량 자료를 실측 수위를 통하여 산정하는 것은 자료의 가용성 부족 및 신뢰성 면에서 적용이 어려우므로 강우-유출모형인 PRMS 모형을 이용하여 자연 유출량을 산정한 건설교통부의 유역조사 보고서 자료를 활용하고자 하였다. 자연 유출량 산정기간은 현재 우리나라 전역에서 동시 우량 관측을 수행하여 이용할 수 있는 관측소들을 조사하여 설정하였을 뿐만 아니라, '67~'68년, '94~'95년의 갈수기간을 포함한 '66~'05년(40년)이다. 그림 3에는 금강권역의 40년간의 월평균 유출량을 나타내었다.

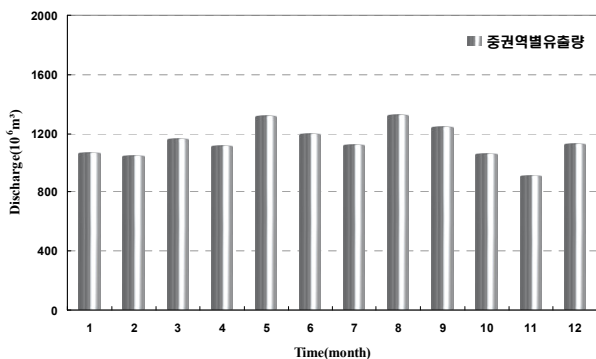


그림 3 낙동강 권역 40년 월평균 유출량

4. 모형의 적용

KModSim 모형을 사용하여 2011년 기준수요에 대한 물수지 분석을 수행하였다. 물수지 분석 계산시간 간격은 5일 단위로 수행하였으며, '66년 10월 ~ '05년 9월까지의 기간에 대해 수행하였다. 생활 및 공업용수의 회수수량은 수요량의 65%가 하류로 회귀되는 것으로 하였으며, 농업용수는 수요량의 65% (순물소모량)을 사용하고 회귀는 없는 것으로 하였다. 각 수요처로부터 하천으로 회귀되는 양은 직 하류에 위치한 소유역으로 유출된다. 그리고 댐 실측유입량을 이용하므로 댐에서의 수면증발량은 고려하지 않았다. 댐의 초기 저수위는 상시 만수위와 10월 1일 평균저수위를 함께 고려하여 결정하였고 댐간 연계운영 방법은 KModSim에서 제공하는 Reservoir Balancing을 통해 댐 간에 동일비율로 수요를 공급하도록 하였다. 광역 물 공급 시설은 현재 운영 중이거나 2004년 수도정비 기본계획에서 반영된 계획 현황을 고려하여 도수시설로 광역 물 이동 망 구성 후 공급 대상 소유역의 생활·공업용수 수요처로 공급하도록 하였다. 수요처의 우선순위는 상류에서 하류로 증가하도록 하고, 하천유지용수, 생활용수, 공업용수, 농업용수 순으로 부여하였다. 낙동강 권역에 대한 물수지 네트워크는 낙동강 하류와 남해안 권역을 예시로 나타내었으며 그림 4와 같다.

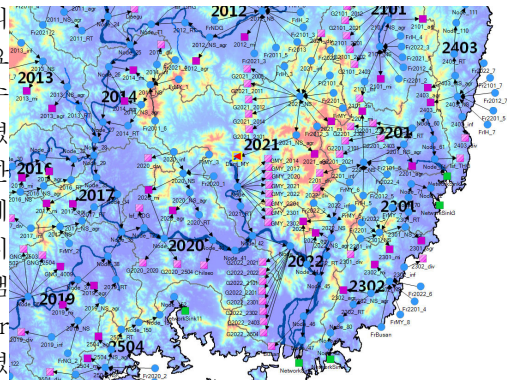


그림 4 낙동강 Network 구성

5. 결과 분석

낙동강 권역에 대해 Reservoir Balancing 전·후의 물수지 분석을 수행하였으며 낙동강 권역의 총 부족량을 비교하여 산정한 결과는 아래의 표 1, 그림 5와 같다.

표 1 Reservoir Balancing 기법의 유무에 따른 낙동강 유역의 부족량 분석

년도	RB미포함	RB	차이(백만톤)	년도	RB미포함	RB	차이(백만톤)
1966	3.97	3.97	0.00	1986	479.71	464.69	15.02
1967	680.78	646.39	34.39	1987	194.77	194.77	0.00
1968	870.30	896.60	-26.30	1988	783.77	700.22	83.55
1969	334.77	332.94	1.83	1989	322.94	321.14	1.80
1970	213.80	213.64	0.16	1990	256.89	256.89	0.00
1971	434.58	434.58	0.00	1991	244.06	244.06	0.00
1972	304.94	300.24	4.70	1992	675.37	643.44	31.94
1973	613.35	606.13	7.22	1993	251.06	251.06	0.00
1974	299.37	297.90	1.48	1994	982.06	919.37	62.69
1975	328.44	327.98	0.46	1995	828.60	806.80	21.80
1976	520.86	507.14	13.72	1996	650.85	631.14	19.71
1977	829.26	745.03	84.24	1997	572.97	555.19	17.79
1978	402.40	383.89	18.51	1998	197.16	197.16	0.00
1979	204.70	203.11	1.59	1999	230.54	225.14	5.39
1980	245.22	245.22	0.00	2000	574.68	510.87	63.81
1981	754.86	716.02	38.83	2001	653.11	617.11	36.00
1982	923.72	849.24	74.48	2002	415.82	397.06	18.76
1983	347.89	329.31	18.58	2003	100.45	100.45	0.00
1984	386.96	366.41	20.55	2004	380.43	378.95	1.49
1985	355.96	354.69	1.27	2005	470.09	450.71	19.38

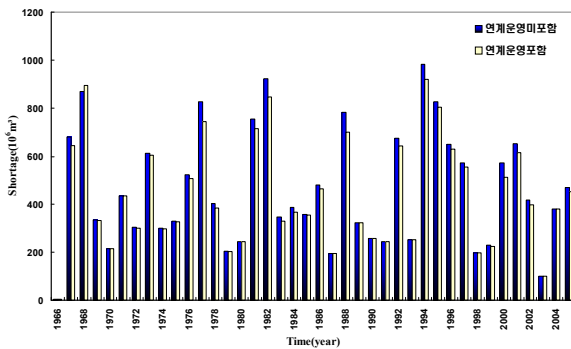


그림 5와 같이 연계 운영을 하지 않았을 경우가 연계 운영을 시행했을 때 보다 대체적으로 부족량이 많이 산정되었다. 특히 1977, 1988년은 댐간 연계 운영의 효과가 약 8천만톤의 수치적 효과를 보이고 있다. 이것은 KModSim 모형으로 물수지 분석을 수행할 경우 Reservoir Balancing을 통한 댐 간 연계 운영이 효율적임을 나타낸다.

그림 5 연계운영의 효과 분석

5. 결론

본 연구에서는 급속히 변화하고 있는 수자원 이용환경에서 보다 합리적인 댐군의 연계운영 방안을 제시하고자 댐군의 연계운영을 위한 물수지분석 모형으로 KModSim 모형을 선정하고, 이에 대한 연계운영 효과를 비교·평가하였다. 연구대상 유역으로는 낙동강 유역을 선정하였으며, 연계운영에 따른 가시적인 효과를 분석하기 위해 댐간 연계운영을 했을 경우와 하지 않았을 경우를 비교·분석 하였다. 그결과 댐 간 연계 운영을 할

경우가 하지 않을 경우와 비교해 대체적으로 효과적인 결과를 나타내었다. 특히 1977, 1988년은 약 8천만톤의 물 부족량을 절감하는 효과를 나타내었다. 이와 같이 저수지 별로 용수 공급의 분담률을 지정할 수 있는 Reservoir Balacing 기법을 사용한다면 보다 더 효율적인 저수지 운영이 가능할 것이다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

1. 김승권, 이용대, 박명기(2005). 낙동강 수계 실시간 댐군 최적 연계운영의 시너지 효과, 2005년도 한국수자원학회 학술발표회 논문집, pp. 289-293.
2. 이재웅(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. John. W. L., Ick-Hwan Ko(2007) KModSim : River basin management decision support system
6. Hirsh, R. M., Cohon, J. L., and ReVelle, C. S.(1977). Gains from Joint Operation of Multiple Reservoir Systems, Water Resources Research.