

한강 수계 댐군의 최적 연계운영을 통한 팔당댐 상시만수위 변경안에 대한 효과 분석

Estimating the effects of increasing the maximum storage level of Paldang reservoir by using optimal operation of reservoirs in Han River

○이재웅*, 정창삼**, 김태순**, 허준행***, 조원철****

1. 서론

산업의 발달과 국민의 생활수준이 향상되면서 전력량과 물의 소비량이 높은 비율로 증가되고 있다. 이들 두 자원은 국민생활에 필수적인 요소로 이들의 원활한 공급이 결국 국가발전의 근간을 형성한다고 해도 과언이 아니다. 특히 수자원의 경우 비교적 풍부하던 과거와 달리 점차 그 절대량이 부족해지는 상황으로 인해 문제의 심각성이 하루가 다르게 악화되어가고 있는 실정이다. 우리나라의 이러한 수자원 상황은 기존의 여러 보고서들을 통해 2006년경이 되면 수자원 부족이라는 한계에 다다를 것으로 예측되고 있다. 하지만 이러한 전체 수자원의 절대부족 상황 속에서도 지금 건설중이거나 예정된 댐들조차 지역주민들의 거센 반발로 건설이 중단되거나 계획조차 불투명해지고 있어 수자원 공급계획의 미래를 어둡게 하고 있다. 이러한 상황에서 현재 수도권의 원활한 용수 공급을 위한 한 방법으로 팔당댐의 상시만수위 1m 증고 방안이 여러 기관들을 통해 검토되어지고 있다. 본 연구에서는 동적계획법을 이용한 수계전체 댐군의 최적연계운영을 통해 팔당 상시만수위의 증고안에 따른 효과를 용수공급의 차원뿐만 아니라 발전 에너지의 편익의 측면에서 증고전의 결과 및 기왕의 운영결과와 비교하여 검토해 보고자 한다.

2. 동적계획법

본 연구에서는 한강 수계 댐군을 합리적으로 운영할 수 있는 최적방안을 마련하기 위하여 동적계획법을 사용하려고 한다. 동적계획법(DP)은 수자원 문제를 해석하기 위해서 널리 사용하는 최적화 기법중의 한 가지이다. 이 기법은 대부분의 수자원 시스템을 최적화 할 때 발생하는 비선형성이나 추계학적인 특징들을 무리없이 처리할 수 있기 때문에 널리 쓰이고 있다.

* 아주대학교 환경도시공학부 조교수

** 연세대학교 대학원 토목공학과 석사과정

*** 연세대학교 공과대학 토목공학과 부교수

**** 연세대학교 공과대학 토목공학과 교수

동적계획법의 장점은 한 번에 한 단계별로 문제를 해석할 수 있다는데 있다. 하지만 실제 시스템의 적용시 계산량이 단계수에 따라서 기하급수적으로 증가하여 실제 시스템에의 적용에 어려움을 주는데 이를 '차원의 저주(curse of dimensionality)'라 한다. 본 시스템과 같이 차원의 수가 높은 경우가 그 예라 할 수 있으며 이러한 문제를 해결하기 위해 본 시스템에서는 성긴 격자법 가운데 하나인 IDP (incremental dynamic programming)을 사용한다. 단, IDP 기법을 사용하면 그 결과가 전 영역 최적해(global optimum)를 보장할 수 없고 국부 최적해(local optimum)밖에 보장할 수 없다는 단점은 있으나 계산량과 계산시간 등을 단축할 수 있다는 장점 때문에 본 과업에서는 IDP 기법을 채택하였다. IDP의 단점을 보완하기 위해 초기레직값을 계속 바꿔가며 최적해의 변화추이를 검토하여 국부 최적해에 빠지는 것을 최소화하였다.

본 연구에서는 비교적 저류용량과 발전량이 수계전체에 어느 정도 영향을 줄 수 있는 7개의 댐을 중심으로 상류의 충주댐, 소양강댐, 화천댐과 용수공급의 중심이 되는 팔당댐을 상태변수로 잡고 나머지 춘천댐, 의암댐, 청평댐과 같은 발전 전용댐을 Flow-through dam으로 설정한 4차원 동적계획법을 일별로 적용하는 시스템을 구성하였다. 이러한 시스템의 구성을 통해 과거 10년간의 사상이 앞으로 발생한다는 가정 하에서 기존의 시스템에서 동적 계획법을 이용한 최적 연계운영을 할 경우와 팔당댐의 상시 만수위 1 m 증고시의 연계운영 결과를 기왕의 운영 결과들과 비교하여 앞으로 발생할 2011년의 수도권 용수수요에는 어떻게 대처할 것이며, 발전량의 경우도 어떻게 될 것인가를 각각 비교하였다. 최적연계운영을 위해 상태변수로 선정된 상류 3개댐에 대한 초기 저수율은 댐 운영시 비교적 적절한 댐의 저수율로 간주되는 기왕의 평균값을 이용하였다.

물론 입력자료로 선정한 10년이라는 짧은 기간동안의 자료로 이 연구에서 개발된 최적화 모형의 적합성을 검증할 수는 없으나, 최소한 최적화 모형의 결과와 기왕의 결과, 그리고 팔당댐 상시 만수위 증고에 따른 연계운영결과를 비교하여 팔당댐의 상시 만수위 변경에 따른 효율성과 각 한 강수계 댐군의 적절한 운영개선방안을 제시할 수 있으리라 예상된다.

3. 모형의 구성

1) 시스템의 구성

본 연구에서 사용한 시스템의 구성을 살펴보면 아래의 그림과 같다.

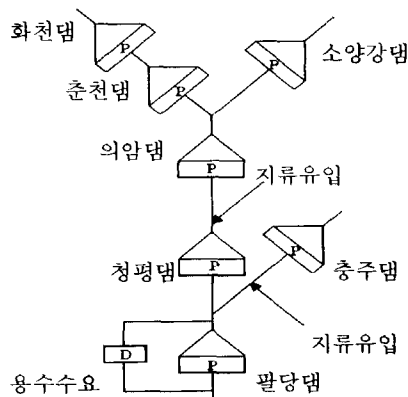


그림. 1 시스템 구성도

2) 입력자료

중요한 입력자료로는 상류댐으로의 월별 유입량과 지류유입량, 각 댐별 발전시설의 특징, 2011년 팔당댐하류에서의 용수수요 예측값, 증발량, 방류량과 방수위의 관계, 상류댐의 초기 저류율 등을 들 수 있다. 월별 상류댐 유입량과 지류유입량 자료는 한국전력공사(1996)의 수력발전소 운용자료집의 기왕의 10년('87년~'96년) 자료를 이용했다. 2011년 예상되는 용수수요량은 6단계까지 건설될 광역상수도의 설계 취수량을 팔당댐 상류에서 항상 일정하게 취수하는 것으로 설정하였고, 하류에서의 하천유지수, 농업용수, 생활용수 및 공업 용수 등은 수자원 개발 가능지점 및 광역배분계획 기본조사 보고서 (한국수자원공사, 1996)의 자료를 이용하여 적용하였다. 각 저수지의 증발량은 인근 측후소의 증발량계수를 이용하여 산정하였다. 방류량과 방수위의 관계는 기존의 자료를 바탕으로 다중 회귀분석법을 이용하여 구하였다. 화천댐과 소양강댐, 충주댐의 초기 저류율은 충주댐 완공후의 10년간('87년~'96년)의 자료의 평균값으로 설정했다. Flow-through 댐으로 선정한 청평댐, 의암댐, 춘천댐의 저수위 및 방수위도 기왕의 10년('87년~'96년)의 평균값을 적용했다.

3) 목적함수

본 과업에서 적용한 IDP 모형의 목적함수는 팔당댐 하류의 용수수요를 우선적으로 만족시키며, 한강 유역내 수력발전량을 최대화하는 동시에 연말 저수지 용량을 최대 저수량의 일정비율로 유지하는 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Max} \sum_{t=1}^{12} \sum_{r=1}^7 [W_1 \times E_{tr} - W_2 \times (u_{tp} - D_{tp})^2 - W_3 \times (X1_{12} - \alpha \times S_{\max})^2] \quad (1)$$

여기서 t 는 각 월을 의미하며, r 은 시스템내의 각 저수지를 나타낸다. W_1 , W_2 , W_3 는 가중치를 나타내며, E_{tr} 은 기간 t 동안 발전소 r 에서의 발전량, u_{tp} 는 t 월의 팔당 저수지에서의 방류량, D_{tp} 는 목표년도(2011년)의 t 월의 팔당댐 하류에서의 용수수요량을 나타낸다. $X1_{12}$ 은 각 저수지 r 의 해당 월말의 저류량을 나타내며, α 는 가중치를 나타내며, S_{\max} 는 만수위시의 저류량을 나타낸다.

위의 목적함수에서 첫 번째 항은 연간 발전에너지를 최대화시키는 항이고, 둘째항은 팔당댐하류 용수수요량과 팔당댐 방류량 사이의 차를 최소화시키는 항이며, 마지막 항은 각 해의 연말 저류량을 일정 수준 이상으로 확보하기 위해서 설정해 놓은 것이다.

4) 제약조건들

동적계획법에서는 각 단계간의 관계식이 필요하며 이를 상태방정식이라고 한다. 상태변수로 지정된 각 댐들의 방류량을 상태방정식의 형태로 나타낸다. 화천, 소양, 충주댐 등 상류에 있는 댐들의 상태방정식은 각 댐의 물수지 방정식(mass balance equation)을 이용하여, 아래 식과 같이 일반적으로 나타낼 수 있다.

$$u_i = X_i - X1_i + I_i - Eva_i \quad (2)$$

여기서, u_i 는 i 댐의 방류량, I_i 는 i 댐의 유입량, X_i 는 i 댐의 월초저류량, $X1_i$ 는 i 댐의 월말저류량, 그리고, Eva_i 는 i 댐의 증발량을 의미한다.

팔당댐의 상태방정식은 상류댐의 방류량에 남한강과 북한강 사이에서 들어오는 지류유입량을

추가하고 팔당댐에서 공급하는 수도권 광역상수도량을 제외하면 되며, 아래 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$u_p = X_p - X1_p + u_{cp} + u_{cj} - Eva_p + r1_{in} - D_p \quad (3)$$

여기서 u_p 는 팔당댐의 방류량, X_p 는 월초 팔당댐의 저류량, $X1_p$ 는 월말 팔당댐의 저류량, u_{cp} 와 u_{cj} 는 청평댐과 충주댐의 방류량, Eva_p 는 팔당댐의 증발량, $r1_{in}$ 는 저류유입량, D_p 는 팔당댐내에서의 취수탑을 통한 광역상수도 취수량이다.

4. 동적계획법에 의한 최적연계운영결과

본 시스템을 한강유역에 적용한 결과를 상시만수위 증고 전·후를 비교하여 정리해 보면 다음과 같다.

첫째, 한강 유역내 댐들을 최적 연계운영하였을 경우 과거의 10년('87~'96)의 수문사상이 2011년 그대로 재현된다고 가정할 경우 팔당댐의 상시만수위 증고에 관계없이 각각 2개년의 사상을 제외하고는 2011년의 증가된 수도권의 용수수요를 대체로 만족시킬 수 있었다. 하지만 팔당댐의 상시만수위의 증고에 따른 용수공급량의 증가는 증고전 공급 총량과 비교하여 증가율이 적어 그 효과가 미미했다.

둘째, 댐들의 최적 연계운영을 통해 발전량의 경우 유역내의 평균값들이 대체적으로 증가되는 효과를 얻을 수 있었다. 하지만, 팔당댐의 상시만수위의 증고시 발생 전력량의 합계는 기존의 연계운영 결과와 비교해 볼 때 증가율이 미미하여 그 효과가 크지 않게 나타났다.

셋째, 댐들의 최적 연계운영시 1988년과 1996년의 사상을 제외하면, 두 가지 경우 모두 상류의 3개 댐에서 의무방류량과 팔당댐에서의 용수수요 및 의무방류량 등을 만족하면서도 각각 평균 연초·연말 저류량을 대체적으로 만족시킬 수 있었다.

문제가 되는 두 해의 경우를 살펴보면, 1988년 사상의 경우 1월~6월 유입량이 화천댐은 예년의 27%, 충주댐은 31%, 소양강댐은 27%, 지류유입량은 84%에 불과하며, 1996년의 사상의 경우는 1월~5월, 9월~12월의 유입량이 예년의 경우와 비교하여 화천댐은 27%, 충주댐은 58%, 소양강댐은 44%, 지류유입은 34%에 불과하기 때문에 용수 부족현상이 나타난 것으로 판단된다. 특히 이 두 해 사상의 특징은 상류댐으로의 유입량이 예년에 비해 매우 적다는 것이며, 이로 인해 상류 각 댐들은 설정 저수율을 유지하기 위해서 방류량을 줄이게 되고 그 여파로 인해 하류의 팔당댐도 상류댐으로부터의 용수 공급 부족으로 인해 역시 의무 방류량을 만족시키지 못하는 현상이 나타나게 되는 것이다. 다시 말해 1988년이나 1996년과 같은 호우 사상이 2011년에 다시 재현된다면 상류댐의 저류율을 설정값 이하로 낮추어 운영하지 않는 한 팔당댐의 상시만수위의 변경과 관계없이 용수부족 현상이 발생하리라는 사실을 알려주고 있다.

5. 결 론

본 연구에서 얻은 결과를 정리해 보면 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

1. 팔당댐 상시만수위 1m 증고는 상류에 위치한 3개 댐에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 이는 분석모형의 계획기간(planning horizon)이 월간운영이기 때문에, 저류용량이 비교

적 작은 팔당댐의 1m 증고에 의한 영향이 상대적으로 무시될 정도로 작기 때문인 것으로 판단된다.

2. 팔당댐 상시만수위 1m 증고는 하류의 용수공급에 큰 도움을 줄 수 없으리라고 판단된다. 이는 팔당댐의 저류량이 결국 상류댐들의 운영에 의하여 결정되기 때문에 유역 전체 가용 수자원의 증가없는 팔당댐 상시만수위 1m 증고는 하류의 용수공급에 큰 영향을 미치지 못할 것으로 생각되기 때문이다.
3. 팔당댐 상시만수위 1m 증고는 유역의 총발전량에 큰 영향을 미치지 못할 것으로 판단된다. 이것 역시 유역 전체 가용 수자원의 큰 변화가 없기 때문에 팔당댐 상시만수위 1m 증고가 유역 총 발전량에 큰 역할을 못하는 것으로 생각된다.

결론적으로 팔당댐의 상시만수위 1m 증고방안은 하류로의 용수공급이나 유역의 발전량 증대에 큰 도움이 되지 못하리라고 판단된다. 하지만 한강 유역내 댐들의 최적연계운영은 유역내 이용가능한 수자원의 효율적 운영을 가능하게 하여 용수공급능력과 유역의 총 발전량을 최대화시킬 수 있는 수단이 될 수 있을 것으로 판단된다.

6. 참고문헌

1. 수력발전소 운용자료집 (1987~1996), 한국전력기술주식회사 발전처 수력발전부.
2. 수자원개발 가능지점 및 광역배분계획 기본조사 보고서 (1996), 한국수자원공사.
3. 이재형, 이길성, 정동국 (1992). "Incremental DP에 의한 홍수시 댐군의 연계운영." 한국수자원학회지, 25(2), pp. 48-55.
4. 충주댐 및 소양강댐 연계운영 Hydro-Scheduling 모형개발 (1993), 한국수자원공사.
5. Seok-Ku Ko (1989). "Optimizing Reservoir Systems Operation with Multiobjective Decision Analysis." Ph.D. thesis, Department of Civil Engineering, Colorado State University.
6. Hall, W. A., R. C. Harboe, W. W. G. Yeh and A. J. Askew (1969), *Optimum Firm Power Output from a Two Reservoir System by Incremental Dynamic Programming*, Contrib. 130, Water Resources Center, University of California, Los Angeles.
7. Turgeon, A. (1982). "Incremental Dynamic Programming May Yield Nonoptimal Solutions", *Water Resources Research*, 17(3), pp. 1599-1604.
8. Dagli, C. H. and Miles, J. F. (1980). "Determining operating policies for a water resource system," *Journal of Hydrology*, 47, pp. 297-299.

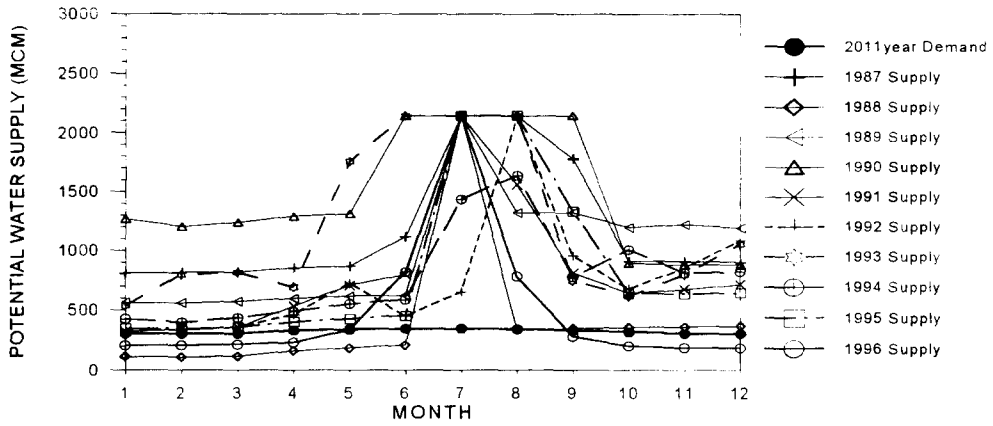


그림. 2 팔당댐의 용수공급전망 (팔당댐 상시만수위의 증고가 없는 경우)

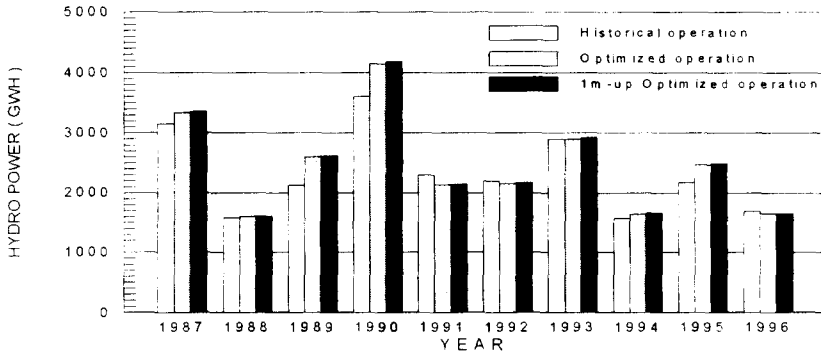


그림. 3 각 댐의 발전량 합계 비교 ('87년~'96년 7개 댐 합계)

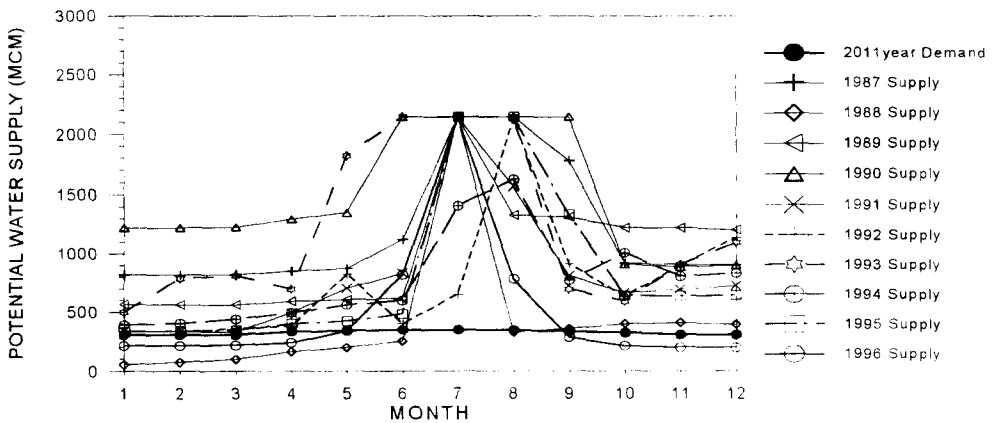


그림. 4 팔당댐 1m 증고후의 용수공급 전망 (팔당댐 상시만수위 1m 증고시)