

추계학적 특성을 고려한 금강수계 최적 연계운영 시스템 개발

Development of the Optimal Joint Operation System for Geumgang

음형일*, 이은구**, 김영오***, 고익환****

Hyung-il Eum, Eun Goo Lee, Young-Oh Kim, Ik hwan Ko

요 지

이수기와 같이 장기적인 관점에서 저수지운영을 해야 하는 관리자는 해당 기간동안의 이익을 최대화하는 전략을 필요로 한다. 이를 위해서는 미래 유입량의 불확실성을 고려한 최적화 모형에 근거한 운영률을 수립해야 할 것이다. 본 연구에서는 금강수계의 이수기를 대상으로 추계학적 최적화 기법인 표본 추계학적 동적계획법(Sampling Stochastic Dynamic Programming)을 적용하여 최적 연계운영 시스템을 개발하였다. 본 연구를 통해 개발된 모형은 상용프로그램인 CSUDP와의 비교를 통해 검증되었으며 이를 기반으로 과거자료를 이용한 SSDP/Hist모형과 앙상블 유량예측(Ensemble Streamflow Prediction)을 이용한 SSDP/ESP모형을 개발하여 두 모형의 장·단점을 비교 분석하였다. 발전부분은 두 모형이 비슷하였으나 용수공급 측면에서는 SSDP/ESP가 SSDP/Hist 보다 우수함을 알 수 있었다.

핵심용어: 이수기 저수지운영, 표본 추계학적 동적계획법, 앙상블 유량예측

1. 서 론

저수지운영에 있어 홍수기와 같이 급변하는 상황하에서 신속하고 능동적으로 대처해야 하는 단기운영은 최적화 모형에 의존하기 보다는 실무자의 직관이 더 중요할 수 있다. 그러나 이수기를 대비한 수자원 관리에 있어 장기적인 관점에서 이익을 극대화하기 위해 관리자는 장기적인 저수지 운영계획을 수립해야 하며 이를 위해서 최적화 모형을 통해 최적 운영률을 구축해야 한다. 최적화 모형으로 제시된 중장기 운영률이 존재할 경우 수자원 관리자는 신뢰와 확신을 가지고 이에 근거한 단기 운영률을 단계적으로 수립할 수 있을 것이다. 현재까지 국내에서 개발 적용된 최적화 기법은 단일 수문곡선을 이용한 확정론적 최적화 기법이 주류를 이루고 있으며, 이렇게 도출된 운영률을 실제 적용하였을 경우 최적화 모형에서 사용한 수문곡선과 동일한 수문곡선이 실제로 발생하기는 힘들기 때문에 최적 운영률이라 하기 어렵다. 따라서 중장기 저수지운영에는 미래 유입량의 불확실성을 고려하기 위해 확률론에 입각한 추계학적 최적화 기법을 적용하여야 한다.

본 연구에서는 금강수계 이수기를 대상으로 미래 유입량의 불확실성을 고려할 수 있는 표본 추계학적 동적계획법을 적용하여 월간 최적 연계운영 시스템을 개발하였다.

2. Sampling SDP 기본이론

Kelman 등(1990)은 기존의 추계학적 동적계획법을 개선하기 위해 과거자료 자체를 SDP 순환식에 적용하여 자료에 내재되어 있는 다양한 시·공간적 상관관계를 재현하는 표본 추계학적 동적계획법(Sampling Stochastic Dynamic Programming, SSDP)을 제안하였다. 이는 기존의 추계학적 동적계획법과 같이 유입량을 확률밀도함수로 가정한 후 유입량의 분포곡선을 몇 개의 구간으로 이산화하는 대신, 과거자료를 직접 최적화

* 서울대학교 지구환경시스템공학부 박사과정 •E-mail : eum01@snu.ac.kr

** 서울대학교 지구환경시스템공학부 석사과정 •E-mail : eungoo2@snu.ac.kr

*** 서울대학교 지구환경시스템공학부 조교수 •E-mail : yokim05@snu.ac.kr

**** 한국수자원공사 수자원연구원 수자원시스템연구소장 •E-mail : ihko@kowaco.or.kr

식에 사용하여 유입량의 불확실성과 상관관계를 표현하는 일종의 비모수적 접근방식이다.

본 연구에서는 과거자료만을 이용한 모형과 앙상블 유량예측(Ensemble Streamflow Prediction, ESP)을 이용한 2가지의 추계학적 최적화 모형을 개발하였으며 이를 각각 SSDP/Hist와 SSDP/ESP로 칭하였다. 과거 자료를 이용한 SSDP/Hist모형의 최적화 식(Kelman 등, 1990)을 제시하면 아래와 같다.

$$\max_{R_t^*} \left[\Pr(j) \sum_{j=1}^M [B_t(R_t, Q_t(j), S_t^k) + f_{t+1}(S_{t+1}^l, j)] \right] \quad (1)$$

여기서 j 는 과거유량 시나리오이고 R_t 는 t 월의 방류량, R_t^* 는 t 월의 목표방류량, $Q_t(j)$ 는 t 월의 과거 유량시나리오 유입량, S_t^k 는 t 월의 k 번째 저수상태변수를 의미한다. 또한 f_t 는 t 월의 잔여최적편익함수(Optimal Future Value Function)를 나타낸다. 시나리오 확률값 $\Pr(j)$ 의 추정방법에는 가장 간단한 방법으로 각 시나리오에 동일하게 $1/M$ 을 부여하는 방법이 있는데 본 연구에서는 이를 채택하였다. 이는 모든 시나리오의 발생할 확률은 같지만 비슷한 유입량을 가지는 시나리오에 대해서 자연스럽게 가중치가 적용되는 장점이 있다.

이러한 SSDP 최적화 기법의 최대 장점은 실제 과거자료를 직접 이용함으로써 자료에 존재하는 다양하고 미묘한 특성들을 그대로 반영할 수 있다는 점이며, 특히 연계운영에 SSDP를 적용할 경우 전 수계내의 소유역별 유입량에 존재하는 상호간의 시·공간적 상관관계를 그대로 재현할 수 있는 장점을 가지고 있다. 기존의 SDP에서는 각 단계에서 최적방류량을 구하는 동시에 잔여최적편익함수 $f_t(\cdot)$ 를 갱신하나, SSDP에서는 후진방향으로 각 단계에서 식 (1)을 이용하여 최적방류량을 결정한 후 이 방류량에 대한 각 시나리오의 가치평가를 다음과 같은 별도의 잔여최적편익함수식으로 갱신한다.

$$f_t^{opt}(S_t^k, i) = B_t(R_t, Q_t(i), S_t^k) + f_{t+1}(S_{t+1}^l, i) \quad (2)$$

Faber and Stedinger(2001)는 과거자료 대신 ESP기법으로 예측한 시나리오를 사용하여 개선된 형태의 SSDP를 제시하고 그 효용성을 입증하였다. 그들은 전 기간의 ESP시나리오를 생성한 후 이를 후진방법으로 풀어 최적운영률을 계산하였으나 전 기간의 ESP시나리오를 생성할 때 기간이 경과할수록 예측 정확성이 낮아지는 단점을 안고 있었다. 그러나 본 연구의 SSDP/ESP는 ESP 예측시나리오를 한 달 동안만 생성하여 SSDP의 현재편익 B_t 를 계산하기 위해 사용하였다. 그리고 두 달 이상의 미래 유입량에는 과거유량 시나리오를 사용하여 계산된 SSDP/Hist의 잔여최적편익함수(f_{t+1})를 대신 적용하였다. 그러므로 본 연구의 SSDP/ESP는 아래 식 (3)과 같은 형태를 가지며 잔여최적편익함수가 미리 계산되어 있으므로 전진방향으로 최적운영률을 구하였다.

$$\max_{R_t^*} \left[\Pr(i) \sum_{i=1}^M [B_t(R_t, Q_t(i), S_t^k) + E_j \{f_{t+1}(S_{t+1}^l, j)\}] \right] \quad (3)$$

여기서 i 는 SSARR 강우-유출 모형으로 생성한 한 달 동안의 ESP 예측 유량시나리오를 의미하며 j 는 과거 유량 시나리오를 의미한다. SSDP/Hist와 SSDP/ESP의 근본적인 차이점은 전자가 off-line 모형인 반면 후자는 매월 새로운 ESP가 생성되면 전진방향으로 매월 최적운영률을 갱신할 수 있는 on-line 모형이라는 점이다. 이러한 특성을 이용하면 한국수자원공사에서는 SSDP/Hist를 10월초 수립하는 연간운영계획에 SSDP/ESP를 월간운영계획에 분리하여 사용할 수 있다. SSDP/Hist와 SSDP/ESP의 연결 관계를 도식화하면 그림 1과 같다.

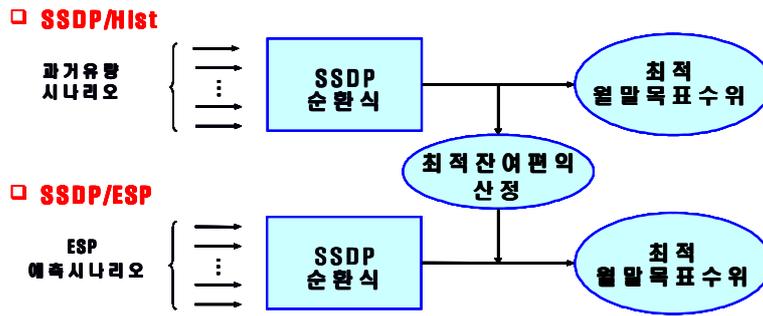


그림 1 SSDP/Hist와 SSDP/ESP의 흐름 연결도

3. 적용사례

최적화모형을 설정하기 위하여 실무자와 지속적인 협의를 거쳐 다음과 같은 몇 가지 저수지 운영규칙을 설정하였다. 용담댐의 경우 금강분류의 하천유지유량을 최우선적으로 방류하였고 이를 만족할 경우 전주권으로 취수를 시행하였다. 금강분류의 이수기 제한방류 초과시에는 만경강으로 방류를 하도록 설정하였고 또 이를 초과할 경우 다시 금강분류로 방류하도록 설정하였다. 대청댐의 경우는 금강분류의 하천유지유량을 최우선적으로 방류한 후 대전권 취수량을 방류하도록 하였고 대전권 취수량을 만족할 경우 하천유지유량 이외의 금강분류 방류량을 결정하였다.

SSDP의 결정변수는 금강수계 내 2개 다목적댐의 월말저수량이며 상태변수는 각 댐의 월초 저수량으로 설정하였고 Savarenskiy 이산화 방법을 적용하여 용담댐 19개, 대청댐 17개로 이산화 하여 전체 323개의 조합(=19*17)에 대한 최적 운영률을 산정하였다. 그 밖의 제약조건으로 제어지점 하천유지유량, 최소, 최대 방류량 그리고 댐 제원을 표 1~표 3에 제시하였다.

표 1 제어지점 최소유지유량(단위: CMS)

옥천	공주	규암	강경
5.9	30.0	30.0	30.0

표 2 최소, 최대 방류량(단위: CMS)

구분	용담1	용담2	대청댐
최소방류량	4.0	5.0	21.0
최대방류량	14.2	6.0	264.0

표 3 댐 제원(단위: MCM)

구분	용담댐	대청댐
상시만수위 저수량	742.5	1241.7
최저수위 저수량	69.0	451.7
유효저수용량	673.5	790.0
6월말 운영기준수위	321.1	645.7

본 연구에서 적용한 목적함수는 전력생산의 최대화, 용수공급부족의 최소화, 그리고 6월말 용수확보저수량과의 편차 최소화의 총 3개 요소로 구성되었다. 이와 같이 구성된 목적함수는 식 (5)와 같다.

$$\max \sum_{i=1}^{N_{dam}} w_{1i} E_i - \sum_{j=1}^{N_{joint}} w_{2j} (Q_{req,j} - Q_j)^2 - \sum_{i=1}^{N_{dam}} w_{3i} (S_{firm,i} - S_{6,i})^2 \quad (5)$$

목적함수의 가중값으로 w_1 은 현재 전력 판매단가를 사용하였으며 용담댐 발전1호기와 발전2호기에 각각 55.05(원/KWh)와 44.99(원/KWh)로 선정하였으며 대청댐은 62.07(원/KWh)로 결정하였다. w_2 는 시행착오법 (trial and error method)에 의해 모의운영시 가장 좋은 결과를 나타내는 값 20(원/M³)으로 결정하였다. 그리고 w_3 는 w_2 가치의 절반($w_3 = 1/2w_2$)으로 가중값을 부여하였다.

4. 적용 결과

본 연구에서 개발한 모형의 검증에 위해 확정론적 동적계획법(Deterministic Dynamic Programming, DDP)을 우선 개발하여 미국의 콜로라도주립대학에서 개발한 CSUDP와 비교 하였다. 모형의 검증 후 DDP를 확장하여 SSDP/Hist모형과 SSDP/ESP모형을 구성하였으며 1998년부터 2002년까지 36개월의 모의운영을 통해 SSDP 최적 운영률을 평가하였다. 그러나 용담댐은 자료가 2000년부터 존재하므로 모의운영 기간동안 용담댐 초기저수량은 용담댐 저수가 거의 완료된 2002년 10월초 저수량인 620.2 MCM으로 가정하였으며 대청댐은 해당 기간의 실적 저수량을 적용하여 모의운영을 실시하였다. SSDP/Hist는 1983년부터 1998년까지 15년 동안의 과거 유량자료를 사용하여 최적운영률을 산정하였고 SSDP/ESP는 동일기간의 SSARR 입력자료인 기상자료를 사용하여 생성한 ESP 예측유량을 사용하여 매월 최적운영률을 갱신하였다. 1998년에서 2002년까지 36개월의 모의운영 결과는 다음과 같다.

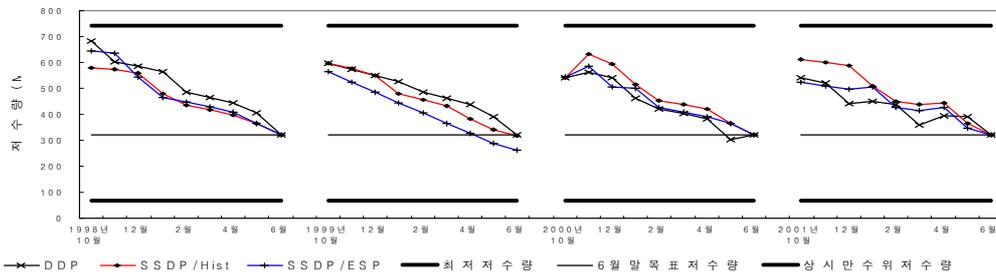


그림 2 용담댐 저수량 변화

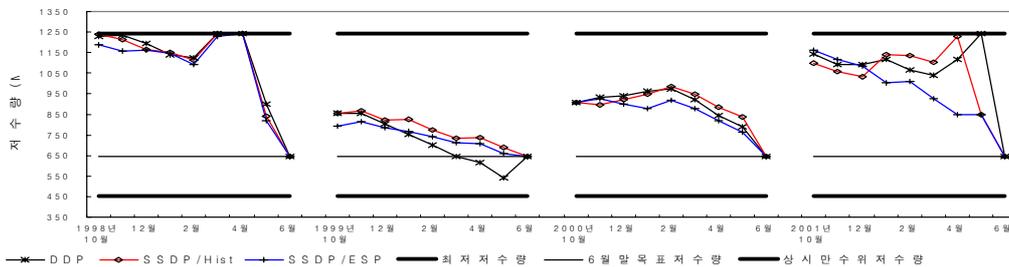


그림 3 대청댐 저수량 변화

표 4에서는 36개월 동안의 모의운영에 대한 총발전량과 용수부족에 대한 평가를 나타내었다. 전력총량은 용담댐과 대청댐의 총발전량이며 신뢰도는 제어지점인 옥천, 공주, 규암 그리고 강경의 신뢰도를 구한 후 이들의 평균값으로 정의하였다. 그리고 총 부족량은 이들 제어지점의 부족량을 모두 합산하여 제시하였다.

표 4 모형별 전력총량과 용수부족에 대한 평가

모형 평가방안	DDP	SSDP/Hist	SSDP/ESP
전력총량(GWh)	778.8	639.8	625.9
신뢰도(%)	99.3	71.5	75.7
총 부족량(MCM)	0.3	370.1	292.6

5. 결론 및 향후연구

확정론적 모형인 DDP는 유입량을 알고 있는 상태에서 운영률을 산정하기 때문에 주어진 조건에서 최선의 결과를 나타낸다. 따라서 이는 모든 모형 결과의 상한선 개념으로 추계학적 모형을 평가할 수 있는 기준이 된다. 모의운영기간 동안의 총발전량에 있어서 SSDP/Hist는 DDP의 82.2 %, SSDP/ESP는 80.4 %에 이르고 있어 전력생산에 있어 두 모형이 비슷한 결과를 보여주었다. 하지만 저수지 운영에서 가장 중요한 요소인 용수공급 측면에서는 SSDP/ESP가 SSDP/Hist 보다 4.2% 향상된 신뢰도를 보여주어 SSDP/ESP가 보다 우수함을 알 수 있었다. 하지만 SSDP/Hist와 SSDP/ESP 모두 유입량이 풍부할 때 즉 10월초 저수량이 풍부할 때 대청댐에서 3월과 4월에 수위를 높이고 6월말의 목표저수량을 맞추기 위해 5월과 6월에 급격하게 방류량을 늘리는 비현실적인 운영을 보여주었다.

본 연구에서는 금강수계 최적연계운영시스템을 구축하기 위해 2가지의 추계학적 모형을 개발, 평가를 실시하였다. 이러한 연계운영효과를 더욱 구체적인 결과를 제시하기 위해서는 용담댐과 대청댐의 단독운영 결과와 비교하는 것이 필요하다. 그리고 용담댐의 실적운영자료가 축적됨에 따라 더 많은 모의운영을 시행하여 SSDP 모형을 평가하는 것이 필요하다. 또한 4월과 5월의 급격한 방류를 줄이기 위한 기준수위 적용 및 목적 함수에 구성된 각 항목의 가중치 변경, 그리고 6월말 목표저수량 설정에 대한 평가기준 마련 등이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비지원(과제번호: 1-6-1)에 의해 수행되었습니다. 이와 관련하여 관계자 분들께 감사드립니다.

참고문헌

1. Faber, B.A. and Stedinger, J.R.(2001). "Reservoir Optimization Using Sampling SDP with Ensemble Streamflow Prediction (ESP) Forecasts." *Journal of Hydrology*, Vol. 249(1-4), pp. 113-133.
2. Kelman, J., Stedinger, J.R., Cooper, L.A., Hsu, E. and Yuan S.Q.(1990). "Sampling stochastic dynamic programming applied to reservoir operation." *Water Resources Research*. Vol. 123(6), pp. 327-335.
3. Tejada-Guibert, J.A., Johnson, S.A., and Stedinger, J.R.(1993). Comparison of Two Approaches for Implementing Multi-reservoir Operating Policies Derived Using Stochastic Dynamic Programming, *Water Resources Research*, Vol. 29, no. 12, pp. 3969-80.