

표본 추계학적 동적계획법을 사용한 한강수계 저수지 운영시스템 개발

Reservoir Operating System Using Sampling Stochastic Dynamic Programming for the Han River Basin

음 형 일* / 박 명 기**

Eum, Hyung-Il / Park, Myung-Ky

Abstract

Korea water resources corporation (K-Water) has developed the real-time water resources management system for the Nakdong and the Geum River basin to efficiently operate multi-purpose dams in the basins. This study has extended to the Han River basin for providing an effective ending target storage of a month to the real-time water resources management system using Sampling Stochastic Dynamic Programming (SSDP), consequently increasing the efficiency of the reservoir system. The optimization model were developed for three reservoirs, named Soyang, Chungju, and Hwacheon, with high priority in terms of the amounts of effective capacity and water supply for the basin. The number of storage state variable for each dam to set an optimization problem has been assigned from the results of sensitivity analysis. Compared with the K-water operating policy with the target water supply elevations, the optimization model suggested in this study showed that the shortfalls are decreased by 37.22 MCM/year for the required water demands in the basin, even increasing 171 GWh in hydro electronic power generation. In addition, the result of a reservoir operating system during the drawdown period applied to real situation demonstrates that additional releases for water quality or hydro electronic power generation would be possible during the drawdown period between 2007 and 2008. On the basis of these simulation results, the applicability of the SSDP model and the reservoir operating system is proved. Therefore, the more efficient reservoir operation can be achieved if the reservoir operating system is extended further to other Korean basins.

Keywords : Real-time water resources management system, Sampling Stochastic Dynamic Programming(SSDP), Han River basin

요 지

한국수자원공사는 낙동강 및 금강수계에 대해 실시간 물관리 시스템을 개발하여 수계 내 다목적 댐의 효율적인 운영을 도모하였다. 본 연구에서는 이를 확장하여 최적화 기법인 표본 추계학적 동적계획법을 사용하여 한강수계 다목적댐의 효율적인 월말 목표저수량을 산정하고 이를 통해 실시간 물관리시스템의 효율을 극대화하고자 수행되었다. 수계 내 댐중 저수용량과 용수공급 측면에서 중요도가 높은 소양강댐, 충주댐, 화천댐 등 3개 댐만을 대상으로 모형

* 교신저자, ESCER Center 박사후과정

Corresponding Author, Post-Doctoral Fellow, ESCER Center, University of Quebec at Montreal, Canada
(e-mail: hieum@sca.uqam.ca)

** 한국수자원공사 경인운하 사업처

Gyeong-in Canal Business Division of K-Water, 188 Joogang-ro Gwachon-si, Gyeonggi-do, 427-100, Korea

을 개발하였으며 저수량 상태변수의 민감도 분석 결과를 통해 저수량 상태변수 개수를 설정하였다. 본 연구를 통해 제시된 최적화모형을 통한 운영률과 한국수자원공사의 운영목표수위에 의한 저수지 운영방식과 비교를 실시한 결과 연평균 37.22 MCM의 수계 내 요구용수 부족량 감소효과와 더불어 발전량 측면에서도 연간 171 GWh가 증가하는 것을 확인하였다. 또한 이수기 저수지 운영계획 시스템을 실제 적용한 결과 2007년~2008년 이수기 동안 전력생산, 수질개선 등을 위한 추가적인 용수공급이 가능하다는 것을 확인하였다. 이러한 실제 적용사례를 통해 SSDP 모형과 이수기 저수지운영 시스템의 그 유용성을 타진할 수 있었으며 다른 수계로 확장을 실시한다면 보다 합리적인 저수지 운영계획이 가능할 것으로 기대한다.

핵심용어 : 표본추계학적 동적계획법, 저수지운영, 한강수계

1. 서론

우리나라는 6월부터 9월까지 3개월 동안의 강수량이 2/3 이상이 집중되는 전형적인 몬순기후의 영향을 받고 있어 홍수기 동안 집중되어 발생하는 홍수피해 저감을 위한 연구를 꾸준히 수행하여 왔다(정한우 등, 2005; 권오익 등, 1999; 김양수, 1998; 이한구와 이상호, 1998; 심명필 등, 1990). 몬순기후로 인해 1년 중 2/3의 강수량이 집중되기 때문에 나머지 기간인 9개월 동안의 갈수기에는 연 강수량의 1/3만을 사용하여 각 수계에 할당된 용수요구량을 공급해야만 한다. 따라서 국내수계의 수자원관리는 홍수기의 홍수피해를 고려함은 물론 갈수기 동안의 용수공급 문제를 동시에 고려해야 하는 어려움이 있다. 따라서 이를 위한 효율적인 수자원 관리가 절실히 요구되는 실정이다.

홍수피해를 방지하면서 안정적인 용수공급을 위해 가용한 수자원을 적극적으로 활용할 수 있는 방안 중 가장 대표적인 것으로 댐 건설을 들 수 있다. 그러나 최근 댐 건설을 위한 경제적, 사회적 여건이 악화되고 있어 새로운 댐 건설보다는 현존하는 댐의 효율적인 운영을 통해 수자원을 추가적으로 확보하려는 노력을 하고 있다(Kim *et al.*, 2007a; Kim *et al.*, 2007b; 한국수자원공사, 2004a). 홍수기와 같이 시간단위로 급변하는 상황에서는 실무자의 직관에 의해 신속하고 능동적으로 대처하는 것이 더욱 효율적일 수 있다. 그러나 장기간에 걸쳐 진행되는 이수기 동안의 효율적인 수자원 관리는 장기적인 저수지 운영계획 수립을 통해 저수지 운영의 이익을 극대화해야 한다. 이는 실무자의 경험보다는 다양한 경우의 수를 조합하고 통계학과 확률론 등과 같은 합리적인 이론에 근거하여 최종적인 결론에 도달할 수 있는 최적화 모형을 통해 수립될 수 있다. 최적화 모형으로 제시된 중장기 운영률이 존재할 경우 수자원 관리자는 신뢰와 확신을 가지고 이에 근거한 단기 운영률을 체계적으로 수립할 수 있을 것이다.

이러한 중장기 최적화 모형을 개발함에 있어 중요한

점은 유량 또는 용수수요 등에 존재하는 불확실성을 고려한 추계학적 최적화 기법이 필요하다는 점이다. 추계학적 모형으로는 음해 추계학적 기법과 양해 추계학적 기법이 있다(Labadie, 2004). 음해 추계학적 기법(Young, 1967)에서는 유입량의 불확실성을 고려하기 위해 방대한 양의 자료를 발생하여 운영률을 산정한 후 회귀분석 등을 통해 최종적인 최적운영률을 얻는다(이재웅, 2004). 이에 반해 양해 추계학적 기법은 불확실성을 최적화 과정에 직접적으로 반영할 수 있도록 구성된다. 저수지 운영에서 대표적으로 사용되는 방법으로 추계학적 동적계획법이 있다(Stedinger *et al.*, 1984; Kim and Palmer, 1997). 고석구 등(1997)은 유입량의 확률수준에 따른 최적 저수위 구간을 양해 추계학적 동적계획법으로 산정하였으며 이재웅 등(2001)은 선행결정규칙과 양해 추계학적 동적계획법을 사용하여 저수지 용량을 결정하고 운영률을 제시하였다. 이와 더불어 최근에는 새로운 오차를 발생시킬 수 있는 자료의 합성 대신 관측 또는 예측된 자료 그 자체를 그대로 사용하는 sampling 기법이 주류를 이루고 있는데 표본 추계학적 동적계획법(Sampling Stochastic Dynamic Programming, SSDP)은 과거자료를 최적화 식에 직접 적용하여 수계 내 다양한 시·공간적 상관관계를 반영할 수 있는 장점이 있다(Kelman *et al.*, 1990). 한국수자원공사에서는 「낙동강 수계 댐군 최적연계운영 시스템 개선 연구(한국수자원공사, 2001)」를 수행하여 국내에서는 최초로 SSDP를 댐군 최적 연계운영에 적용하였으며 이를 다시 개선하여 낙동강 수계 실시간 물관리시스템을 구축하였다(한국수자원공사, 2004b). 이와 더불어, 수자원의 지속적 확보기술 개발 사업단의 21세기 프론티어 연구개발 사업인 「실시간 물관리 운영시스템 구축기술 개발」 연구를 통해 SSDP를 활용한 금강 수계 최적 연계운영률을 개발하였다(한국수자원공사, 2004a). 기 개발된 낙동강 수계와 금강 수계 실시간 물관리시스템은 댐 운영을 위해 추계학적 특성을 고려한 SSDP 모형을 통해 최적의 월말 목표저수량을 산정하고 이를 혼합정수계획법을 사

용한 최적화모형(CoMOM 모형)의 입력값으로 사용하여 일별 최적운영률을 도출하도록 구성되어 있다(Lee *et al.*, 2008).

최근 한국수자원공사에서는 금강 및 낙동강 수계에 기 개발된 실시간 물관리 시스템을 한강 수계로 확장하여 실시간으로 수량과 수질을 분석할 수 있는 저수지 운영시스템을 개발하고 수계별 물이용 효율을 극대화하고자 「한강 수계 실시간 저수지 운영 시스템 구축 용역」을 실시하였다. 그러나 이 과업에서는 기존 실시간 물관리시스템과 달리 월 최적화모형인 SSDP 모형이 배제되어 있어 효율적인 월말 목표저수량을 제시하지 못하고 있다. 따라서 본 연구에서는 금강 및 낙동강 수계와 마찬가지로 SSDP 최적화모형을 사용하여 한강수계의 효율적인 월말 목표저수량을 산정하고 이를 통해 실시간 물관리시스템의 효율을 극대화하고자 하였다. 이와 더불어 다양한 유출 시나리오에 따른 결과를 검토할 수 있도록 저수지 운영계획 시스템을 개발하여 이를 실제 한강시스템에 적용하였다. 이를 통해 개발된 시스템에서 제시된 이수가 연간운영계획과 한국수자원공사에서 실제 수립한 연간운영계획을 비교하여 본 연구에서 제시한 시스템의 효용성을 입증하였다.

2. 표본추계학적 동적계획법(Sampling Stochastic Dynamic Programming, SSDP)

동적계획법(dynamic programming, DP)은 목적함수와 제약조건, 즉 발전함수와 같은 식에 존재하는 비선형성을 다루기 쉽고 Markov 의사결정과정을 통해 추계학적 특성을 가진 문제를 다루기 유용할 뿐만 아니라 저수지 운영과 같은 다중 의사결정을 요구하는 문제에 체계적 과정을 제공할 수 있어 시스템 분야에 널리 사용되어온 대표적인 최적화 기법 중 하나이다. 특히 추계학적 동적계획법(Stochastic DP, SDP)은 확률변수에 존재하는 불확실성을 최적화 식을 통해 직접적으로 고

려할 수 있는 장점이 있어 저수지 운영에 활발히 적용되어 왔다. 기존의 SDP는 확률변수에 대한 분포를 설정한 후 설정된 분포를 다시 몇 개의 구간으로 이산화하여 각 구간에 대한 대표값과 확률을 사용하여 문제를 해결해 나간다. 그러나 SSDP(Kelman *et al.*, 1990)는 Eq. (1)에서 제시한 바와 같이 유량 시나리오를 직접 최적화 식에 적용하여 유입량의 불확실성을 고려하므로 확률변수의 분포선정 및 이산화 과정이 요구되지 않는다. 특히, 자료 자체에 내재된 시·공간적 상관관계와 유량자료의 연속성을 반영할 수 있는 장점이 있어 단일 유역이 아닌 몇 개의 소유역으로 구성된 수계에 적용하는 것이 바람직하다(Labadie, 2004).

Eq. (1)에서 B_t 는 시간 t 의 편익을 나타내며 S_t^k 는 시간 t 의 k 번째 저수량, $Q_t(i)$ 는 시간 t 동안의 유입시나리오 i , S_{min} 과 S_{max} 는 각각 최소저수량 및 최대저수량, R_t^* , R_t 는 각각 시간 t 동안의 목표방류량(target release)과 실제방류량(real release), E 는 기대값, H_t 는 시간 t 의 수문상태변수로 현재 유입량 이외의 저수지운영에 유용한 추가적인 수문정보를 의미한다.

Eq. (1)을 통해 각 단계(stage)와 저수상태(state)에 대한 목표방류량이 결정되면 이 목표방류량에 대한 각 시나리오(i)의 가치를 평가하기 위해 Eq. (3)을 사용하여 잔여최적편익함수(optimal future value function)를 갱신해 나간다.

Eq. (3)에서 주의할 점은 기존의 SDP에서는 최적방류량을 결정하면서 잔여최적편익함수도 산정되어지지만 SSDP에서는 Eq. (1)을 이용하여 최적방류량을 결정한 후 다시 Eq. (3)을 통해 잔여최적편익함수를 산정한다는 것이다.

Kelman *et al.*(1990)은 다양한 형태의 SSDP를 제안하였는데 수문상태변수를 사용하지 않은 경우 Eqs. (4) and (5)와 같이 보다 간단한 형태의 SSDP로 변환할 수 있다.

$$\max_{R_t^*} E \left[B_t(S_t^k, Q_t(i), R_t) + E_{H_{t+1}|H_t, i} \{ f_{t+1}(S_{t+1}^1, H_{t+1}, i) \} \right] \quad \forall S_t, H_t, i, t \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{s.t. } S_{t+1} &= S_t + Q_t - R_t^* && (\text{if } S_{t+1} < S_{\min}, R_t^* = S_t + Q_t - S_{\min} = R_t \\ &\text{or if } S_{t+1} < S_{\max}, R_t^* = S_t + Q_t - S_{\max} = R_t \\ &\text{otherwise } R_t^* = R_t) \end{aligned} \quad (2)$$

$$f_t(S_t^k, i) = B_t(S_t^k, Q_t(i), R_t) + E_{H_{t+1}|H_t, i} \{ f_{t+1}(S_{t+1}^1, H_{t+1}, i) \} \quad \forall S_t, H_t, i, t \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (3)$$

$$\max_{R_t^*} \sum_{i=1}^M \Pr(i) \left[B_t(S_t^k, Q_t(i), R_t) + f_{t+1}(S_{t+1}^1, i) \right] \quad \forall S_t, i, t \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (4)$$

$$f_t(\mathbf{S}_t^k, i) = B_t(\mathbf{S}_t^k, Q_t(i), \mathbf{R}_t) + f_{t+1}(\mathbf{S}_{t+1}^k, i) \quad \forall \mathbf{S}_t, i, t \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (5)$$

$$\max_{\mathbf{R}_t^*} \frac{1}{M} \sum_{i=1}^M [B_t(\mathbf{S}_t^k, Q_t(i), \mathbf{R}_t) + f_{t+1}(\mathbf{S}_{t+1}^k, i)] \quad \forall \mathbf{S}_t, i, t \in \{1, 2, \dots, T\} \quad (6)$$

여기서 M 은 시나리오 개수이며 $\Pr(i)$ 는 유량시나리오 i 가 발생할 확률이다. 현재 월의 유입량을 알고 있다고 가정할 경우 저수, 중수, 풍수 등 조건부적인 운영률을 제시할 수 있지만 월운영과 같이 장기간의 운영단위 모형에서는 이러한 가정을 적용하기에 무리가 있다. 따라서 본 연구에서는 실제 저수지운영 상황과 유사한 현재 월의 유입량이 미지수인 경우에 대한 SSDP모형을 적용하였다. 각 시나리오는 그 당시의 강수량과 유역의 여러 가지 특성이 반영되어 나름대로의 유량경로를 가지고 있기 때문에 시나리오마다 발생확률을 부여하는 것은 그리 단순치 않다. 시나리오의 발생확률을 부여하기 위한 가장 간단한 방법은 단순히 동일 확률을 부여하는 것으로 이러한 경우 Eq. (6)과 같이 표현할 수 있다. 본 연구에서는 기존의 금강 및 낙동강 수계 실시간 물관리시스템과 마찬가지로 SSDP 최적화 식 중 Eq. (6)을 사용하여 한강 수계 연계운영률을 산정하였고 과거 자료만을 근거로 최적운영률을 산정했기 때문에 이를 SSDP/Hist라 칭하였다.

3. 최적화 문제의 설정

최적화 문제의 설정을 위해서는 실제 저수지 운영상황을 사실과 근접하도록 수학적으로 표현해야 한다. 그러나 때때로 실제 상황을 수학적으로 표현하기가 까다로운 상황에 봉착하는 경우가 많다. 이러한 문제를 해

결할 수 있는 가장 좋은 방법은 그 시스템의 특성과 상황을 가장 잘 알고 있는 실무자와의 지속적인 대화를 통해 목적함수와 제약조건을 구성하는 것이다. 본 연구에서는 저수지 운영 업무를 담당하고 있는 한국수자원공사 물관리센터의 실무진과 공동으로 모형을 개발하였으며 이러한 문제점이 자연스럽게 해소될 수 있었으며 이러한 노력이 선행연구에서도 지속적으로 이루어져 한강 수계에 대한 목적함수와 제약조건 구성에 들인 노력과 시간이 이전보다 상당히 감소하였다.

3.1 수계 모식화

한강수계는 북한강의 평화의 댐, 화천댐, 소양강댐, 청평댐, 팔당댐 등과 남한강의 충주댐 등 수계 내 총 13개의 댐이 위치해 있다. 동적계획법은 비선형성의 제어, 추계학적 특성을 직접적으로 고려할 수 있다는 장점을 가진 반면, 저수지의 개수가 증가할 때 마다 계산량이 지수적으로 증가하게 되어 ‘curse of dimensionality’가 발생하는 단점을 가지고 있다. 따라서 본 연구에서는 한강 수계 내 13개 댐을 모두 고려하지 않고 수계 내 용수공급을 위한 기여도는 댐의 용량에 비례한다고 가정하여 댐의 유효용량이 큰 소양강댐, 충주댐, 화천댐 3개 댐만을 대상으로 최적화를 실시하고자 하였다. 또한 팔당댐 하류의 요구용량인 $124 \text{ m}^3/\text{sec}$ 과 댐 내 취수 및 하천 내 취수량을 고려하여 Fig. 1과 같은 모식도를 SSDP 최적화를 위해 본 연구에서 사용하였다.

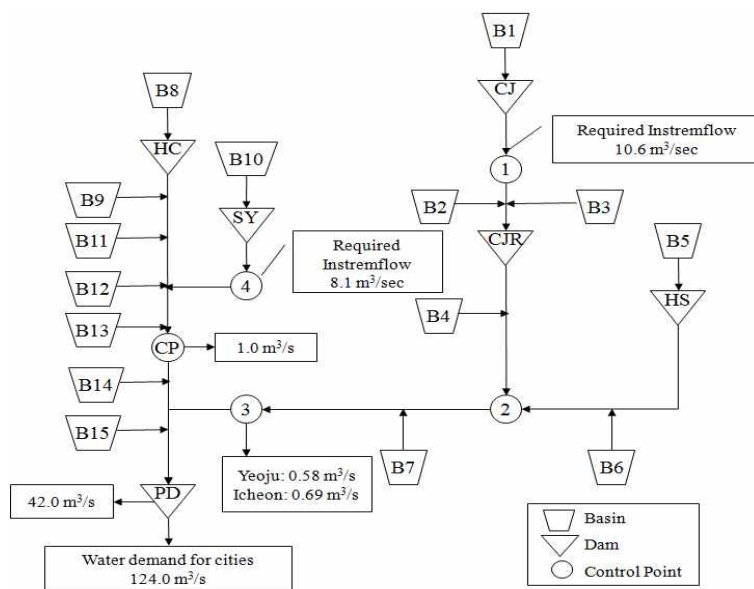


Fig. 1. Schematic Map of the Han River Basin for SSDP Model

3.2 목적함수 및 제약조건

최적화(optimization)란 현재 처한 상황에서 가장 좋은 결과를 나타낼 수 있는 일련의 행위를 찾는 과정이다. 즉, 고려하고 있는 시스템의 제약조건을 만족하는 동시에 이득을 최대로 하거나 피해를 최소로 하는 과정이다 (Rao, 1996). 이를 위해 시스템의 편익 또는 비용을 결정변수의 함수로 표현하여 함수값이 최대 또는 최소가 되도록 하는 결정변수를 찾는 과정을 수학적으로 해결한다. 그러므로 최적화란 어떠한 목적함수와 제약조건을 구성하는가에 따라 상이한 결과를 도출하게 되며 적합한 목적함수를 구성하는 것은 최적화의 기본이 되는 시발점이다.

최적화모형에서는 각 목적들을 정량화하고 결정변수를 수학적 함수로 표현하여 사용한다. 저수지 운영에서 현재의 방류로 인한 이득이나 손해를 계산하는 것은 가능하나 미래의 손익을 나타내는 댐 저수량의 가치를 표현하는 것은 매우 까다로운 것이 사실이다. 따라서 이러한 방류량과 저수량의 가치를 잘 표현하기 위해서는 실제 댐운영 상황을 현실적으로 반영하는 것이 중요하다.

우리나라의 수자원관리는 수문학적 특성상 이수기와 홍수기를 명확하게 구분하여 실시되고 있다. 우선, 이수기 수자원관리의 최우선적인 목적은 안정적인 용수 공급에 있다. 또한 홍수기에는 하류의 홍수피해를 최소화하는 것이 최우선적 목적이기 때문에 이를 위해 저수량을 감소시켜 미래의 홍수에 대비할 수 있는 공간을 확보해야 하는 상황에 처하게 된다. 특히, 이수기가 종료되고 홍수기가 시작되는 6월에는 이수기와 홍수기의 목적을 동시에 고려해야 하는 어려움에 처하게 된다. 댐운영을 위해 한국수자원공사에서 설정하고 있는 6월말 운영목표수위는 미래 1년 동안 20년빈도 유입량이 발생했을 때 안정적인 용수공급을 할 수 있도록 설정되어 있다. 또한 홍수기 제한수위는 일정 빈도의 큰 홍수를 제어할 수 있도록 설정된 수위이다. 따라서 안정적인 용수공급을 보장할 수 있는 6월말 운영목표수

위를 목표저수량이자 하한선으로 설정하고 홍수기 제한수위를 상한선으로 설정하여 6월말 저수량이 이 범위 내에 존재할 수 있도록 이를 본 연구의 목적함수에 포함하였다. 이와 더불어 전력생산에 의한 발전이익을 고려하였다. 따라서 용수공급, 6월말 운영목표수위 범위 준수, 발전이익의 3가지 목적을 고려하여 Eq. (7)과 같은 목적함수를 구성하였으며 이를 통해 Eq. (6)의 $B(\cdot)$ 를 산정하였다.

Eq. (7)에서, w_i 는 목적 i 에 대한 가중값, m 은 제어지점번호로 본 연구에서는 총 4개($M=4$)의 제어지점을 사용하였다(Fig. 1 참조). 그리고 n 은 댐 번호로서 $n=1$ 은 소양강댐을, $n=2$ 는 충주댐, $n=3$ 는 화천댐을 의미하며 N 은 댐의 총 개수로 본 연구에서는 3이 사용되었다. 또한 QF_{pal}^{Req} 는 팔당댐에서의 요구방류량인 $124.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ 을 의미하고 QF_{pal} 은 팔당댐의 실제유입량을 의미한다. 본 연구에서는 팔당댐 운영을 실시하지 않고 Fig. 1에서 제시한 것과 같이 산정된 팔당댐 총 유입량 중 댐내 취수량인 $42.0 \text{ m}^3/\text{sec}$ 를 제외한 모든 유입량이 방류되는 run-of-river 댐으로 간주하여 운영하였다. QF_m^{Req} 는 제어지점 m 에서의 하천유지유량, $QF_{t,m}$ 은 t 월의 제어지점 m 에서의 하천유량, $R_{t,n}^{Req}$ 는 t 월 동안의 댐 n 의 요구방류량으로 댐 하류로의 최소요구방류량($R_{t,n}^{Min}$)과 댐 내 취수요구량의 합($DIV_{t,n}^{Req}$)으로 정의된다. 또한 $R_{t,n}$ 은 댐 n 의 t 월 동안의 방류량(댐내 취수 포함), $R_{t,n}^{max}$ 는 댐 n 의 t 월 동안의 최대방류량을 의미한다. 즉, 용수부족은 댐 하류에서 발생하는 부족량($QF_m^{Req}-QF_{t,m}$)과 댐 내에서 발생하는 부족량($R_{t,n}^{Req}-R_{t,n}$)으로 구분할 수 있다. $S_{6,n}$ 은 6월말 저수량, $S_{6,n}^{MaxRef}$ 는 댐 n 의 6월 가능최대홍수량(PMF)에 대응하기 위한 저수량, $S_{6,n}^{MinRef}$ 는 댐 n 의 최저확보수위 저수량(20년 빈도 유입량에 대해 1년 동안 정상적인 용수공급이 가능한 수위에 해당하는 저수량)을 나타내며, $BP_{t,n}$ 은 각 댐의 발전단가를 사용하여 t 월의 댐 n 의 발전생산량을 나타낸다.

$$\min_{R_t^*} \sum_{t=1}^T \left[w_1 (\max [(QF_{t,pal}^{Req} - QF_{t,pal}), 0]) + \left\{ w_2 \left(\sum_{m=1}^M \max [(QF_m^{Req} - QF_{t,m}), 0] + \sum_{n=1}^N \max [(R_{t,n}^{Req} - R_{t,n}), 0] \right) + w_3 \sum_{n=1}^N \max [0, (S_{6,n} - S_{6,n}^{MaxRef}), (S_{6,n}^{MinRef} - S_{6,n})] - w_4 \sum_{n=1}^N BP_{t,n} \right\} \right] \quad (7)$$

$$\max \{0, \min [S_t + Q_t - S_{min}, R_{t,n}^{Req}]\} \leq R_{t,n} \leq R_{t,n}^{max} \quad (8)$$

Table 1. Constraints in Reservoir Operations

Contents		Soyang	Chungju	Hwacheon	Paldang
Storage (MCM)	Maximum	2543.8	2385.2	1018.4	-
	Minimum	686.8	596.3	360.4	-
Release (m ³ /s)	Maximum	250.8	828.0	185.0	-
	Minimum	38.1	86.6	2.6	-
Target Storage at the End of June (MCM)	Upper	2069.4	2134.1	805.426	-
	Lower	1031.6	858.5	381.6	-
Instream Flow Required at the Downstream (m ³ /s)		8.1	10.6	-	124.0

본 연구에서는 Eq. (6)과 같은 다중목적함수 문제를 다루기 위해 국내·외에서 많이 사용되고 쉽게 다중목적함수를 정량화할 수 있는 가중법을 사용하였다. 따라서 목적함수를 구성하는 각 목적에 상대적 중요도를 나타내는 가중값을 설정하고자 기존의 금강, 낙동강 수계와 마찬가지로 목적 사이에 명확한 우선순위를 부여한 가중값을 부여하였다 (음형일 등, 2005). 즉, 목적함수에 고려된 4가지 목적의 최대발생크기를 고려하여 $w_1 = 10^{12}$, $w_2 = 10^8$, $w_3 = 10^4$, 그리고 $w_4 = 10^0$ 과 같은 가중값을 부여함으로써 각 목적별 우선순위가 서로 침범될 수 없도록 절대우선순위 방식을 사용하였다.

또한 한강 수계 내 댐의 최대발전방류량을 댐의 최대방류량으로 설정하였으며 각 댐의 기본계획방류량 중생·공용수량을 댐내 최소요구방류량으로 설정하여 적용하였다. 주의할 점은 댐내 최소요구방류량은 Eq. (8)에 나타난 바와 같이 최적화모형에서 hard constraint로 사용되지 않고 soft constraint로 사용되어 최소요구방류량 이하의 방류량도 가능하도록 설정되었다. 또한 앞의 Eq. (2)에 의해 제시된 저수량의 상한선과 하한선은 각각 상시만수위와 최저저수위로 설정하였다. 이러한 각 댐의 경계조건과 제어제점의 요구량은 Table 1에 제시하였다.

3.3 저수상태변수의 이산화

동적계획법은 계산상의 편리함을 위해 일반적으로 상태변수인 저수량을 이산화 한 후 이산화된 저수량에 대한 최적해를 구한다. 이러한 상태변수를 이산화하는 방법으로는 Savarenskiy 방법과 Moran 방법이 있으나 전자의 방법이 후자의 방법보다 수렴도 빠르고 보다 효

율적인 운영률을 산정하는 것으로 알려져 있다(Klemes, 1977). 따라서 본 연구에서는 상태변수의 이산화를 위해 Savarenskiy 방법을 선택하였고 저류상태변수의 이산화 개수를 결정하기 위해 Klemes(1977)가 제안한 Eq. (9)를 사용하였다.

$$n \geq \left\lceil \left[\frac{S}{2(R - Q_{\min})} + 2 \right] \right\rceil \quad (9)$$

or $\left\lceil \left[\frac{S}{2(Q_{\max} - R)} + 2 \right] \right\rceil$

여기서 R은 방류량을 뜻하고 Q_{\min} 과 Q_{\max} 는 각각 최소유입량과 최대유입량을 뜻한다. 또한 S는 유효저수용량을 의미한다. 여기서 저수용량과 방류량, 유입량의 단위가 다르기 때문에 모형의 단위시간에 따라 유입량과 방류량의 단위를 저수용량과 같은 체적단위로 환산하는 것이 필요하다. 본 연구에서 최소유입량은 각 댐의 유입량 자료를 분석하여 최소값으로 선택하였고 방류량은 각 댐내 취수량과 기본계획방류량을 고려하여 결정하였다. 또한 저수상태변수 개수를 결정하기 위해 Karamouz and Houck(1987)는 각 댐의 유효저수용량과 연평균 유입량에 따른 적당한 이산화 개수를 제안하였는데 연평균 유입량의 20~50 % 저수용량을 갖는 댐은 작거나 중간정도의 댐으로 규정하고 있고, 연평균 유입량의 100 % 저수용량을 갖는 댐은 대규모 댐으로 규정하고 있다. 이렇게 분류된 댐의 적절한 저류상태변수 이산화 개수는 중소규모의 댐은 20~30개, 대규모 댐은 50개 이상이다. 이러한 2가지 방법으로 각 댐의 이산화 개수를 산정한 결과는 Table 2에 제시하였다.

Table 2. The Number of Discretization by the Two Methods

Dams	S (MCM)	R (MCM)	Qmin (MCM)	Storage/ Annual Average Inflow	Annual Average Inflow (MCM)	Number of Discretization	
						Klemes	Karamouz and Houck
Soyang	1856.9	98.8	2.59	0.84	2218.1	10	> 50
Chungju	1788.9	224.5	26.96	0.33	5478.8	5	20~30
Hwacheon	658.0	20.7	8.42	0.23	2912.2	27	20~30

본 연구에서는 상기 언급한 이산화 개수를 설정방식을 통해 이산화 개수를 산정한 후 이를 바탕으로 각 댐에 대해 몇 가지 이산화 개수를 설정하고 이에 대한 민감도 분석 후 이산화 개수를 결정하고자 하였다.

4. SSDP 모형의 적용 및 효과분석

본 연구에서는 한강 수계에 대해 수자원장기종합계획(2001)에서 사용한 1967년부터 2001년까지의 총 35년

의 과거 유출량을 사용하여 앞의 20년의 과거자료를 사용하여 최적운영률을 산정하였으며 이후 '86년 10월~'01년 6월의 15년 동안의 자료를 사용하여 모형을 검증하였다. SSDP/Hist 모형은 이수기인 10월부터 6월 까지 총 9개월만을 대상으로 개발되었다. 따라서 Table 3과 같은 15년 동안의 각 댐의 9월말 실제저수량을 초기값으로 설정하여 각각 9개월동안 모의운영을 실시하였으며 실제저수량과 SSDP/Hist를 통한 저수량을 비교하고자 하였다.

Table 3. Initial Storages of October for Simulation

Unit: 10⁶ m³

Year	Soyang	Chungju	Hwacheon
1986	2072.54	1845.49	869.00
1987	2223.85	1840.38	413.20
1988	1498.77	1537.77	360.40
1989	1940.07	2124.48	711.90
1990	2274.67	2000.11	970.41
1991	2022.96	1922.49	711.00
1992	2036.49	2042.04	819.54
1993	1977.46	1859.40	690.42
1994	1263.01	1430.89	806.16
1995	2047.36	1807.07	825.29
1996	1425.18	1181.03	740.70
1997	1655.53	1550.05	731.40
1998	1956.85	1756.46	750.30
1999	2403.20	2323.26	937.64
2000	2082.46	2294.37	933.32

Table 4. Combinations of Storage State Variable for 3 Reservoirs

Dams	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Soyang	15	15	15	15	20
Chungju	5	8	8	10	15
Hwacheon	10	10	12	12	10

Table 5. Simulation Results Corresponding to the Combinations of Storage State Variable

Unit: 10⁶ m³

Contents	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
Shortfalls for Water Demand of Paldang Downstream	359.8	360.5	355.2	288.1	285.8
Shortfalls for the Minimum Required Release	459.4	459.4	459.4	459.4	459.4
Total Shortfalls	820.2.0	821.9	817.6	751.5	750.2

4.1 저수상태변수의 이산화 개수에 따른 민감도 분석

앞 절에서 언급한 저수상태 변수의 이산화 개수에 근거하여 몇 개의 이산화 개수 조합을 설정하여 그에 따른 최적운영률을 산정하고 이에 따른 모의운영을 실시하여 그 결과를 검토하고자 하였다. Table 2를 보면 Klemes에 의한 이산화 개수가 충주댐의 이산화 개수가 가장 적고 화천댐이 가장 많게 산정되었다. 그러나 소양강댐과 충주댐은 하류의 용수공급에 중추적인 역할을 담당하도록 운영되고 있는 데에 반해 화천댐은 수력발전용댐이기 때문에 상대적으로 두 다목적 댐에 비해 팔당댐 하류 용수공급에 있어 그 중요도가 높지 않은 것으로 파악되었다. 이를 반영하여 Table 4와 같이 총 5개의 이산화 개수 조합에 따른 모의운영 결과를 비교·검토하였다.

우선적으로 Eq. (6)의 목적함수를 고려해 볼 때 가장 중요한 항목으로 팔당댐의 하류 요구방류량인 124.0 m³/s를 만족하는지에 대한 여부이다. 이는 팔당댐 하류의 수도권 대도시 지역에 공급하는 생·공용수량으로서 상류의 소양강댐과 화천댐, 충주댐의 연계운영 효과가 나타나는 척도이다. 그 다음으로 하천 본래의 기능을 발휘하기 위한 하천 내 요구량에 대한 만족여부를 검토하였다. 이러한 두 가지 척도를 중심으로 이산화 개수에 따른 민감도 분석을 실시하였다.

Table 5는 5가지 이산화 개수 조합에 따른 제어지점에서의 부족량을 제시하고 있다. 이를 보면 이산화 개수가 가장 많을수록 좋은 효과를 나타내고 있다. 그러나 여기서 주목할 점은 case 4(15×10×12=1,800)가 case 5 (20×15×10=3,000)에 비해 이는 이산화 개수가 적지만 결과는 큰 차이를 보이고 있지 않은 것을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 최종적으로 case 4인 소양강댐

15개, 충주댐 10개, 화천댐 12개의 이산화 개수 조합을 선택하여 이를 적용하였다.

4.2 SSDP모형의 효용성 검증

본 연구를 통해 개발된 한강 수계 SSDP 모형의 효용성을 검증하기 위해 다목적댐 연간운영계획 시 사용되는 20년빈도 댐 유입량에 의해 설정된 한국수자원공사의 운영목표수위를 사용한 댐 운영방식과 SSDP/Hist 모형을 통한 모의결과를 비교하고자 하였다.

우선, 한강 수계 내 3개 댐의 운영목표수위에 의한 댐 운영방식을 간략히 소개하면 다음과 같다. 한국수자원공사에서 관리하고 있는 소양강댐과 충주댐은 용수공급을 위해 최소확보수위(lower target water supply elevation)와 적정확보수위(upper target water supply elevation)와 같은 운영목표수위를 설정하여 댐을 운영하고 있다. 따라서 월초저수량이 최소확보수위 이하에서는 실수요량을 공급하고 예년평균수위와 최소확보수위 사이에 존재하면 기본계획공급량 중 생·공용수와 농업용수를 공급하도록 설정하여 3개 댐에서 총 132.8 m³/sec를 방류하도록 설정하였고 그 이상의 저수량에 대해서는 기본계획공급량을 모두 공급하는 것으로 설정하였다. 그러나 화천댐은 수력발전댐이므로 하류 용수공급을 위해 설정된 방류량이 존재하지 않기 때문에 본 연구에서는 화천댐의 20년빈도 유입량을 근거로 최소확보수위를 설정하여 월초저수량이 최소확보수위 이하일 경우 과거 화천댐 방류량의 백분위수 5에 해당하는 방류량을 적용하였고 예년평균수위 이상일 경우, 과거 방류량의 평균값을 적용하였다. Table 6은 이러한 운영목표수위(target water supply elevation)를 이용한 댐 운영방식을 제시하고 있으며 이를 K-Water 운영방식이라 칭하였다.

Table 6. Reservoir Operation by Target Water Supply Elevations

Conditions of Initial Storage	Release		
	Soyang	Chungju	Hwacheon
> average	Planned agricultural + municipal + industrial water demands	Planned agricultural + municipal + industrial water demands	historically averaged release
Between Average and Lower Target Water Supply Elevation	Planned municipal + industrial water demands	Planned municipal + industrial water demands	8.1 m ³ /s
Lower Target Water Supply Elevation <	Real municipal + industrial water demands	Real municipal + industrial water demands	5 percentile value of the observed releases data

Table 7. Simulation Results Corresponding to the Reservoir Operating Policies

Operating Policies	Shortfalls for the Minimum Required Release of Dam [MCM/year]			Shortfalls for Water Demand of Paldang Downstream [MCM/year]	Total Shortfalls [MCM/year]	Hydro Electric Power Generation [GWh/year]
	Soyang	Chungju	Hwacheon			
SSDP/Hist	0.0	30.63	0.0	19.21	49.84	797.3
K-Water	0.0	9.14	23.51	54.41	87.06	625.8

모의조건은 이산화 개수에 따른 민감도분석과 동일한 실적 10월초 저수량을 사용하였으며 '86년 10월~'01년 6월의 15년 동안의 자료를 사용하여 모의운영을 실시하였다. Fig. 2는 이러한 모의운영을 통한 소양강댐의 저수량을 나타내고 있다. 이를 보면 가뭄이 발생한 87년과 96년의 기간에 SSDP 모형은 운영목표수위에 의한 운영률에 비해 팔당댐 하류의 용수요구량을 공급하기 위해 저수량을 보다 적극적으로 활용하고 있는 것을 알 수 있으며 K-Water 운영방식에 비해 실적저수량과 보다 유사한 운영을 하고 있음을 알 수 있다. Table 7은 이러한 운영결과를 제시하고 있다. 이를 보면 충주댐의 최소요구방류량에 대해 SSDP/Hist가 보다 많은 양의 부족량을 나타내고 있는데 이는 SSDP/Hist 모형이 충주댐 저수량을 유지하기 위해 보다 보수적인 저수지 운영을 실시했기 때문으로 파악된다. 그러나 팔당댐 하류 및 3개 댐에 대한 부족량을 살펴보면 K-Water 운영방식에 비해 SSDP/Hist가 연평균 37.22 MCM의 부족량 감소효과를 나타내고 있을 뿐만 아니라 발전량 측면에서도 연간 171 GWh가 증가하는 것을 확인할 수 있다. SSDP/Hist 모형에서는 서울 등 대도시 지역으로

의 용수공급을 담당하고 팔당댐에서 하류 의무방류량인 124 m³/sec를 준수하는 것을 가장 중요한 것으로 설정하여 모형을 구성하였다. 이러한 관점에서 팔당댐 하류의 용수요구량에 대한 연평균 35.21 MCM의 발생부족량 차이는 SSDP/Hist 모형으로 인해 팔당댐 상류에 존재하는 3개 댐의 효율적인 연계운영과 보다 안정적인 대도시로의 용수공급이 가능하다는 것을 나타내고 있는 것으로 사료된다.

4.3 이수기 저수지 운영계획 시스템

본 연구에서 제시한 SSDP/Hist모형은 최적화 수행시 사용된 시나리오에 기초한 최적운영률을 제시하고 있다. 따라서 기후변화를 고려한 미래 발생 가능한 시나리오를 반영한다면 기후변화에 대응할 수 있는 운영률을 제시하는 것이 가능하다. 또한 SSDP/Hist모형의 궁극적인 목적은 실시간 저수지운영이 아닌 연간 저수지 운영계획 검토에 있다고 할 수 있다. 이는 현재 한국수자원공사에 저수지 운영 계획에 사용하고 있는 상·하한 운영목표수위의 대안으로 사용될 수 있으며 각각의 수위비교 및 검토를 통해 보다 효율적

인 저수지 운영계획을 수립하는 데 일조할 수 있다고 사료된다.

SSDP/Hist 모형은 저수지 운영에 직접 적용하기 전에 기 관측된 유출량을 사용하여 미리 최적운영률을 산정하는 off-line 모형이다 (Kim *et al.*, 2007b). 따라서 기 작성된 SSDP/Hist의 월별 최적운영률은 관측된 월 초저수량 자료만 있으면 이수기 모든 월에 적용이 가능하기 때문에 이수기가 시작하는 10월초에 가능한 유출량 시나리오를 적용하여 연간 저수지 운영계획을 검토 및 수립할 수 있다. 또한 이수기 운영이 진행되는 동안 수문상황이 예상한 상황과 다르게 진행되는 경우, 이러한 변화를 반영한 예측 유출시나리오가 존재한다면 이수기 중간의 어느 월에서도 수정된 예측 유출시나리오와 SSDP/Hist의 최적운영률을 적용하여 저수지 운영계획을 검토할 수 있다.

본 연구에서는 이수기 초기뿐만 아니라 이수기 진행 중에도 적용이 가능한 이수기 저수지 운영계획 시스템을 구성하였다. Fig. 3은 이러한 저수지 운영계획 시스템의 적용절차를 제시하고 있다.

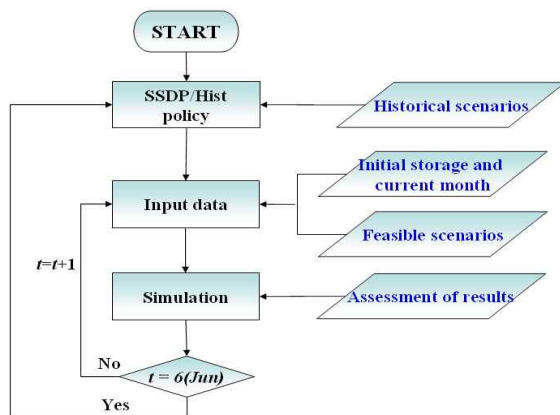


Fig. 3. Schematic Procedure of Reservoir Operating System for the Drawdown Period

우선 저수지 운영에 적용하기 전 관측된 과거 시나리오를 이용하여 최적운영률을 산정하고 난 후 운영계획을 위한 입력자료 즉, 월초저수량 및 발생가능 시나리오를 입력한다. 그리고 모의운영을 실시하여 시나리오 별 저수량을 검토한 후 현재 월부터 이수기 종점인 6월말까지의 저수지 운영계획을 실시한다. 이를 매 월초 또는 매 월말 새로운 정보를 통해 유용한 유출 시나리오가 생성되면 앞서 언급한 과정을 반복하여 실시하여 운영계획을 수정해 나갈 수 있다. 이수기가 끝나면 축적된 과거 자료를 통해 새로운 최적운영

률을 산정하여 이를 다시 저수지 운영계획에 사용하게 된다.

본 연구를 통해 개발된 저수지 운영계획 시스템의 유용성을 확인하고자 한강 수계 내 댐들의 2007년 9월말 저수량을 기준으로 하여 운영목표수위 검토를 실시하였다. 금회에는 이수기 중간에는 실시하지 않았으며 모든 경우에 있어 이수기 시작인 9월말부터 시작하는 것을 설정하였다. 한강 수계 내 소양강댐, 충주댐, 화천댐의 2007년 9월말 저수량은 풍부한 강수량으로 인해 각각 소양강댐 2015.41 MCM (EL.184.51 m), 충주댐 2385.25 MCM (EL.141.0 m), 화천댐 891.56 MCM (EL.177.42 m) 등 매우 풍족한 저수량을 보유하고 있었다. 따라서 용수공급에는 별 문제점이 없을 것으로 판단하여 한국수자원공사에서 산정한 20년빈도 유입량을 적용했을 경우와 과거 1967년~2001년 기간 동안의 소유역별 유출 시나리오를 적용하여 SSDP모형을 통한 저수량의 상한선과 하한선인 Upper (SSDP)와 Lower (SSDP)를 비교하고자 하였다.

이러한 2007년 9월말 저수량에 대해 검토된 각 댐의 저수량 범위와 한국수자원공사에서 수립한 운영목표수위의 상한선 및 하한선을 비교한 결과는 Fig. 4와 Fig. 5에 제시하였다. 소양강댐과 충주댐은 한국수자원공사에 의해 관리되고 있는 다목적 댐이기 때문에 이들 두 댐에 대해서는 댐운영 guideline에 해당하는 기간별 운영목표수위가 설정되어 있다. 그러나 화천댐은 발전전용댐이기 때문에 이러한 댐운영을 위한 기간별 운영목표수위를 설정하여 운영하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 기간별 운영목표수위가 존재하는 한강수계 내 두 다목적 댐을 대상으로 SSDP/Hist 모형에 의한 수위와 비교하고자 하였다. 이를 보면 현재의 10월초 저수량을 기준으로 할 때 이수기 동안 20년빈도 유입량이 발생했을 경우 그 저수위(파선)가 소양강댐과 충주댐 모두 운영목표수위의 하한선을 상회하고 있어 1년 이상 연속되는 가뭄에도 충분히 대비할 수 있는 저수위를 유지할 수 있다는 것을 알 수 있다. 특히, 충주댐의 경우 현재 10월초 저수위에 대해서 20년빈도 유입량이 발생하더라도 상한선을 상회하는 수위가 기대되는 것을 알 수 있다. 이는 2년 이상 연속 20년빈도에 해당하는 가뭄이 발생하여도 용수공급에 차질이 없다는 것을 의미한다. 이는 2007년 10월 이후의 이수기 동안 용수공급 뿐만 아니라 전력생산, 하류 수질정화를 위한 추가방류 등이 충분히 검토될 수 있어 유연성 있는 저수지 운영이 가능하다는 것을 의미한다.

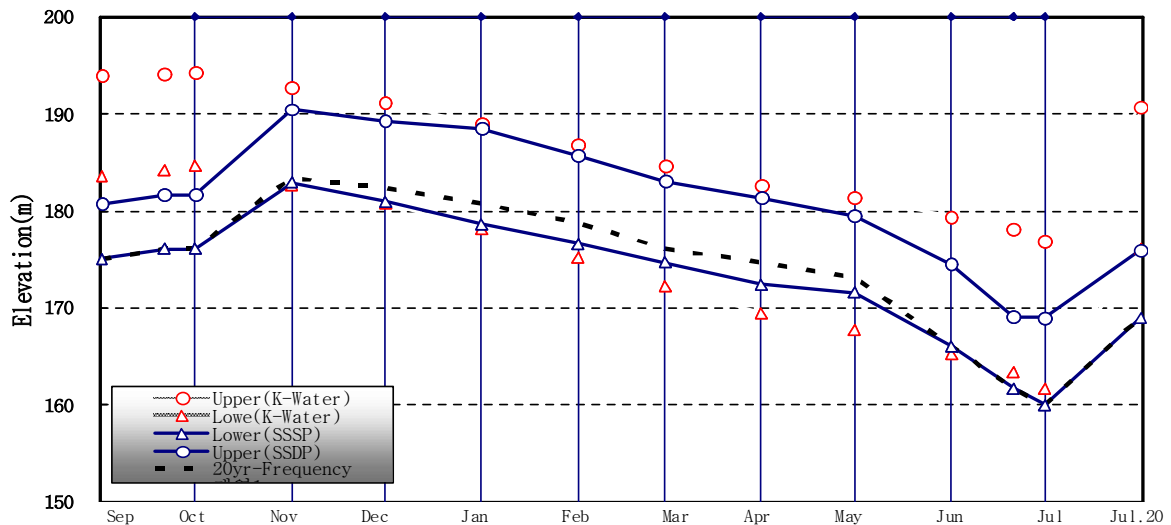


Fig. 4. Annual Operating Plan During the Drawdown Period (Soyang Dam)

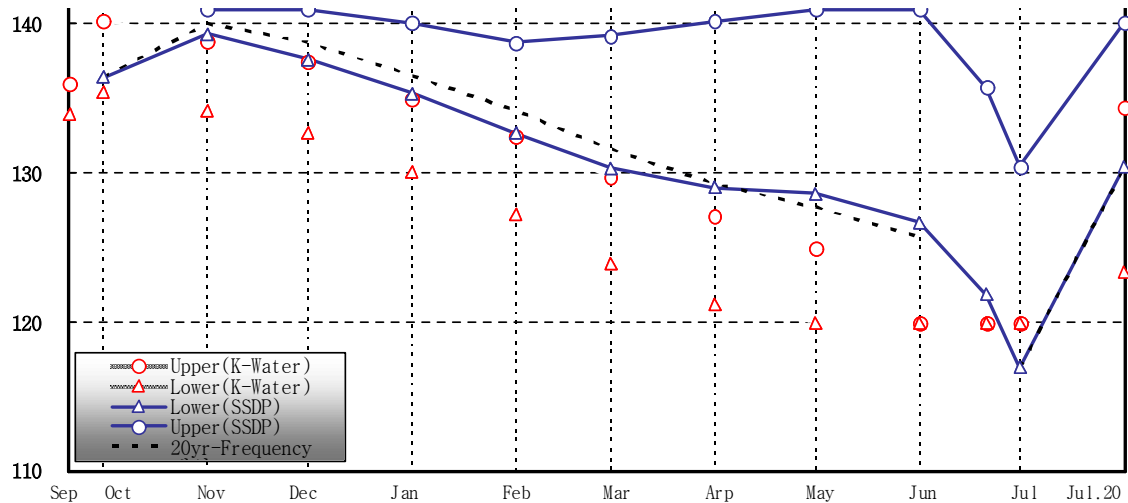


Fig. 5. Annual Operating Plan During the Drawdown Period (Chungju Dam)

5. 요약 및 결론

본 연구는 한강수계를 대상으로 SSDP 모형을 개발하여 효율적인 월말 목표저수량을 산정하고 이를 통해 실시간 물관리시스템의 효율을 극대화하고자 수행되었다. 이와 더불어 다양한 유출 시나리오에 따른 결과를 검토할 수 있도록 저수지 운영계획 시스템을 개발하여 이를 실제 시스템에 적용하여 이에 대한 효용성을 입증하고자 하였다.

이를 위해 수계 내 저수용량과 용수공급 측면에서

중요도가 높은 소양강댐, 충주댐, 화천댐 등 3개 댐만을 대상으로 하였으며 저수량 상태변수 개수의 민감도 분석 결과에 따라 소양강댐 15개, 충주댐 10개, 화천댐 12개로 이산화하여 최적운영률을 산정하였다. 또한 본 연구를 통해 개발된 SSDP/Hist 모형을 검증하기 위해 한국수자원공사의 운영목표수위에 의한 저수지 운영방식과 비교를 실시하였다. 그 결과 SSDP/Hist가 연평균 37.22 MCM의 부족량 감소효과와 더불어 발전량 측면에서도 연간 171 GWh가 증가하는 것을 확인하였다. 특히 팔당댐 하류 요구방류량인 124 m³/sec에 대한 두 운

영률의 부족량 차이가 연평균 35.21 MCM을 보여 SSDP/Hist 모형이 상류에 존재하는 3개 댐을 효율적으로 연계하여 하류 요구방류량을 보다 만족시키는 효율적인 운영률을 제시하고 있는 것을 확인하였다. 이와 더불어 본 연구에서는 이수기 동안 어느 때라도 현재 월부터 이수기 종점인 6월말까지 저수지 운영계획을 실시할 수 있도록 이수기 저수지 운영계획 시스템을 개발하였다. 이를 한강수계 2007년 9월말 저수량을 대상으로 운영계획을 실시한 결과 홍수기의 적절한 대응으로 풍부한 저수량을 보유하여 물공급 운영목표수위의 하한선을 우회하는 것을 확인하였다. 이는 20년빈도에 해당하는 가뭄이 1년 이상 지속되어도 안정적인 용수공급이 가능하다는 것을 의미하기 때문에 유연성 있는 저수지 운영이 가능하다는 것을 의미한다. 이러한 실제 적용사례를 통해 본 연구에서 제시한 저수지운영 시스템의 유용성을 타진할 수 있었으며 전력생산 및 수질정화를 위한 추가방류 등을 타진할 수 있는 검토가 가능함을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 화천댐 방류량 백분위 5를 적용하여 모의운영을 실시하였는데 이러한 설정이 저수지 운영에 어떠한 영향을 미치고 있는지 그에 대한 평가가 필요하다고 사료된다. 또한 본 연구에서 제시한 SSDP/Hist 모형의 우수성과 이수기 저수지 운영계획을 시스템의 효율성을 실질적인 적용을 통해 확인하였다. 따라서 실시간 물관리시스템이 기 구축된 금강, 낙동강 수계뿐만 아니라 국내 수계에 이수기 저수지 운영계획 시스템을 확장한다면 보다 효율적이고 합리적인 저수지 운영계획이 가능할 것으로 기대한다.

감사의 글

본 논문에 사용된 자료를 제공해 주신 한국수자원공사 물관리센터에 감사드립니다.

참고 문헌

건설교통부 (2001). 수자원장기종합계획 · Water vision 2020, 건설교통부, 연구보고서

고석구, 이광만, 이한구 (1997). “양해 추계학적 동적계획법에 의한 저수지 운영률 개발.” **한국수자원학회 논문집**, 제30권, 제3호, pp. 269-278.

권오익, 김승, 심명필 (1999). “한강 홍수예경보시스템의 저수지 운영모듈 개선.” **한국수자원학회논문집**, 제32권, 제6호, pp. 685-695.

김양수 (1994). “홍수시 저수지 운영 방법의 고찰

(Technical ROM을 중심으로).” **한국수자원지**, 제27권, 제4호, pp. 14-18.

심명필, 선우중호, 박인보, 이재형, 정동국 (1990). “홍수기중의 실시간 저수지운영 모형(I): 이론과 모형화.” **한국수자원학회지**, 제23권, 제3호, pp. 373-384.

음형일, 김영오, 윤지현, 고익환 (2005). “국내 다목적댐 운영계획에 적합한 목적함수에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 제38권, 제9호, pp. 737-746.

이재웅 (2004). “다목적댐의 연계운영을 위한 최적운영률 개발.” **한국수자원학회논문집**, 제37권, 제6호, pp. 487-497.

이재웅, 위희상 (2001). “선형결정규칙과 추계학적 동적계획법을 이용한 저수지 규모결정 및 운영에 관한 연구.” **대한토목학회논문집**, 제21권, 제2-B호, pp. 93-100.

이한구, 이상호 (1998). “복합 모델링 기법을 이용한 홍수시 저수지 최적 운영 (사례 연구 : 충주 다목적 저수지).” **한국수자원학회논문집**, 제31권, 제6호, pp. 727-739.

정한우, 최승안, 김형수, 심명필 (2005). “타부탐색기법에 의한 홍수시 저수지운영에 관한 연구.” **한국수자원학회논문집**, 제38권, 제9호, pp. 761-770.

한국수자원공사 (2001). 낙동강 수계 댐군 최적연계운영 시스템 개선 연구, 건설교통부, 연구보고서

한국수자원공사 (2004a). 실시간 물관리 운영시스템 구축기술 개발, 과학기술부, 연구보고서

한국수자원공사 (2004b). 유역통합물관리를 위한 하천유출량 예측방안 연구, 건설교통부, 연구보고서

Karamouz, M., and Houck, M.H. (1987). “Comparison of stochastic and deterministic dynamic programming for reservoir operating rule generation.” *Water Resources Bulletin*, Vol. 23, No. 1, pp. 1-9.

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*, AGU, Vol. 26, No. 2, pp. 447-454.

Kim, Y.-O., Eum, H.-I., Kim, S.-U., and Lee, K.S. (2007a). “Monthly joint operations for the Nakdong multi-reservoir system in Korea.” *Water International*, Vol. 32, No. 3, pp. 416-427.

Kim, Y.-O., Eum, H.-I., Lee, E.G., and Ko., I.H. (2007b). “Optimizing operational policies of a Korean multi-reservoir system using sampling

- stochastic dynamic programming with ensemble streamflow prediction.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 131, No. 1, pp. 4-14.
- Kim, Y.-O., and Palmer, R.N. (1997). “Value of seasonal flow forecasts in Bayesian stochastic programming.” *Journal of Water Resource Planning and Management*, ASCE, Vol. 123, No. 6, pp. 327-335.
- Klemes, V. (1977). “Value of information in reservoir optimization.” *Water Resources Research*, Vol. 13, No. 5, pp. 857-850.
- Stedinger, J.R., Sule, B.F., Loucks, D.P. (1984). “Stochastic dynamic programming models for reservoir operation optimization.” *Water Resources Research*, AGU, Vol. 20, No. 11, pp. 1499-1505.
- Labadie, J.W. (2004). “Optimal operation of multireservoir systems: State-of-the-art review.” *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 130, No. 2, pp. 93-111.
- Lee, Y., Kim, S.-K., Ko, I.H. (2008). “Multistage stochastic linear programming model for daily coordinated multi-reservoir operation.” *Hydroinformatics*, Vol. 20, No. 11, pp. 1499-1505.
- Rao, S.S. (1996). *Engineering Optimization*, John Wiley & Sons, NY.
- Young, G.K. (1967). “Finding reservoir operation rules.” *Journal of Hydraulics Division*, Vol. 93(HY6), pp. 297-321.

논문번호: 09-030	접수: 2009.03.17
수정일자: 2009.09.15/11.12	심사완료: 2009.11.12