

미래 예측유입량의 불확실성을 고려한
다목적댐 최적 연계운영 모형의 개발
Optimal multireservoir operation
under uncertainty in forecasted future inflow

김민석*, 정건희**, 김종훈***

Min Seok Kim, Gun Hui Chung, Joong Hoon Kim

요 지

본 연구에서는 비선형계획법을 이용하여 해공간의 비선형성을 적절히 제어하고, 예측유입량의 불확실성을 고려하면서 하나의 최적 의사결정을 내릴 수 있는 다목적댐 최적 연계운영 모형을 개발하였다. 모형의 적용성을 검증하기 위하여 금강유역에 모형을 적용하고 2020~2021년 이수기에 대해 가상으로 운영하여 보았으며, 적용결과 의사결정평균모형에 비해 향상된 결과를 도출하는 것을 확인하였다.

핵심용어 : 다목적댐, 최적연계운영, 비선형계획법, 라그랑지안 완화기법, GCM, 불확실성

1. 서론

수자원의 효율적인 관리를 통해 생활용수, 공업용수, 농업용수 등을 적절히 공급하고, 수력발전을 통한 전력획득을 위해 다목적댐과 같은 저수지의 필요성이 대두되고 있다. 이러한 다목적댐을 효율적으로 이용하기 위해서는 저류량이나 방류량에 대한 운영계획을 적절히 수립하여야한다. 다목적댐 최적운영모형의 경우 전력생산량 등이 결정변수에 대해 비선형적인 특성을 가지므로, 이를 적절히 제어하면서 풀어내기가 쉽지 않다. 또한 최적연계운영을 위해서는 예측유입량의 불확실성을 적절히 반영하여야하나, 여러개의 예측유입량 시계열을 포함할 때 일반적인 비선형 모형을 통하여 하나의 의사결정을 도출하기 힘들다.

2. 연구방향

본 연구에서는 예측유입량의 불확실성을 고려하여 장기적인 관점에서의 다목적댐 운영이익을 극대화하기 위한 월별 다목적댐 최적 운영모형을 제시하고자 한다. 운영이익은 시스템 내의 모든 다목적댐에서 전력생산으로 발생하는 이득에, 각 중권역에서 용수부족으로 인해 발생하는 손실을 고려하는 것으로 정의하였다.

여기서 이익에 포함된 전력량으로 인하여 목적함수가 비선형적인 형태를 가지게 된다. 이러한 경우와 같이 목적함수가 비선형적인 형태를 가지게 되면, 이를 직접적으로는 선형으로 풀 수 없기 때문에 최적화 과정에 어려움이 따르게 된다. 또한 마지막 의사결정 시점에서의 경계조건이 정의

* 정회원 · (주)하존이앤씨 수자원부 대리 · E-mail : stynerz@naver.com

** 정회원 · 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학부 연구교수 · E-mail : gunhui@korea.ac.kr

*** 정회원 · 고려대학교 공과대학 건축·사회환경공학부 정교수 · E-mail : jaykim@korea.ac.kr

되어 있지 않으며 장기간 예측 수문자료를 이용할 때 발생하게 되는 불확실성을 고려하기 힘들다는 점 또한 모형구성을 어렵게 한다.

본 연구에서는 목적함수를 풀어내는 방법으로 비선형계획법을 채택하여 비선형성을 적절히 제어하였으며, Zhang et al.(1991)이 제안한 잔여편익함수 산정기법을 이용하여 마지막 의사결정 시점에서의 경계조건을 설정하였다.

장기간 예측 수문자료의 불확실성을 고려하는 방법으로는 <그림 1>과 같은 세가지 방법이 있다. 확정론적모형은 여러개의 예측유입량 시계열을 이용하여 발생가능성이 높은 하나의 시계열을 생성하고 이를 이용하여 의사결정을 내리는 방법이며, 의사결정 평균모형은 각 발생 시계열을 이용하여 시계열 개수만큼의 의사결정을 생성한 후, 이를 평균하여 최종의사결정을 내리는 방법이다. 이와 같은 방법들은 예측유입량에 존재하는 불확실성을 적절히 반영하지 못한다는 단점을 내포하고 있다. 본 연구에서 제안된 모형은 모든 시계열을 각각 고려하면서 의사결정시에 의사결정 시점 이후의 기간까지 고려하여 시계열에 존재하는 불확실성을 최대한 반영하게 된다. 제안된 모형의 경우 해공간이 크게 복잡해지게 되며 이를 해결하기 위하여 본 연구에서는 라그랑지안 완화 기법을 도입하여 최적화 모형을 풀기 쉬운 모형으로 변환하였다.

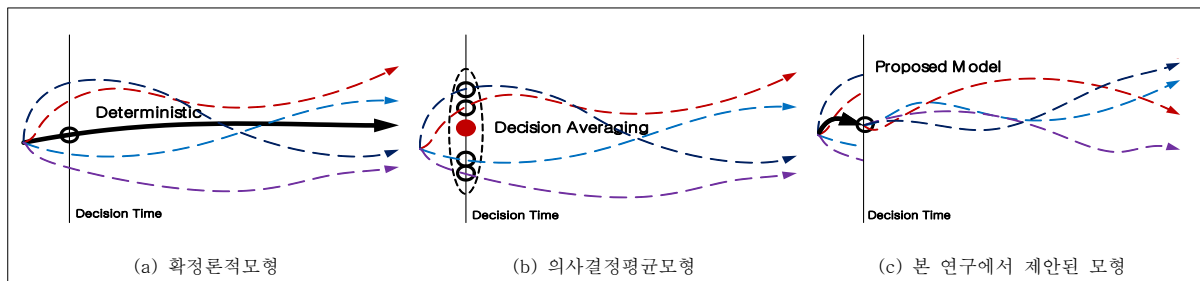


그림 1. 예측 수문자료의 불확실성을 고려하는 방법

3. 모형의 유도

본 연구의 목적은 전력생산에 의한 이익과 용수부족에 대한 손실을 고려하여 시스템 내부에 있는 모든 다목적댐의 연계운영으로 인해 얻을 수 있는 이익을 최대화하는 것이며, 이를 위한 일반적인 최적화 모형은 다음과 같다.

$$Z = \max_{\mathbf{H}_{ij}} E \left[\sum_{j=1}^M \left(\sum_{i=1}^{NR} (c_1 P_{ij}) - \sum_{k=1}^{NSB} \max(c_2 (D_{kj} - W_{kj}), 0) \right) \right] \quad (1a)$$

s.t.

$$S_{ij} = S_{i,j-1} + \tilde{X}_{ij} - Q_{ij} \quad (1b)$$

$$\underline{H}_{il} \leq H_{ij} \leq \overline{H}_{il} \quad (1c)$$

$$\underline{Q}_{il} \leq Q_{ij} \leq \overline{Q}_{il} \quad (1d)$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K \quad (1e)$$

여기서 NR 과 M 은 각각 다목적댐의 개수, 운영 기간이며, NSB 는 시스템 내에 존재하는 소유역의 개수이다. i, j, k 는 각각 다목적댐과 의사결정 시점, 시스템 내의 중권역을 의미하며 c_1 은 단위 전력생산량에 대한 이익, c_2 는 단위 용수부족량에 대한 손실을 의미한다. 또한 P_{ij} 는 전력생산

량, D_{kj} 는 용수 요구량, W_{kj} 는 용수 공급량이다. S_{ij} 는 다목적댐의 저류량이며, \widetilde{X}_{ij} 는 다목적댐으로의 유입량, Q_{ij} 는 다목적댐의 방류량이며, H_{ij} 는 다목적댐의 내수위이다. l 은 의사결정 시점 j 에 대한 역월이며, \underline{H}_{il} , \overline{H}_{il} 은 각각 $l(j)$ 에서 i 번째 다목적댐의 저수위와 상시만수위를 의미하며, \underline{Q}_{il} , \overline{Q}_{il} 은 각각 $l(j)$ 에서 i 번째 다목적댐의 최소방류량과 한계방류량을 의미한다.

본 연구에서는 위와 같은 일반적인 최적화 모형을 잔여편익함수, 라그랑지안 완화기법의 도입 등을 통하여 변환하였으며 변환된 모형은 다음과 같이 크게 부문제와 주문제로 나누어진다.

첫 번째 부문제는 첫 번째 의사결정 기간 동안 예측된 각각의 유입량을 동시에 고려함으로써, 모든 예측유입량에 대해 하나의 의사결정을 내리는 것이다. 그 외의 부문제는 첫 번째 의사결정이 끝나고 난 후부터 예측 시계열을 고려하려는 마지막 기간까지, 각 예측 시계열에 대해 각각의 의사결정을 하는 것이다. 먼저 첫 번째 부문제는 다음 식과 같다.

$$L_F = \max_{H_{i1}} \sum_{w=1}^S p^w \left(\sum_{i=1}^{NR} c_1 P_{i1}(X_{i1}^w, H_{i0}, H_{i1}) \right) - \sum_{k=1}^{NSB} \max(c_2(D_{k1} - W_{k1}^w), 0) + \sum_{w=1}^S \sum_{i=1}^{NR} \pi_i^w H_{i1} \quad (2a)$$

s.t.

$$S_{ij}^w = S_{ij-1} + X_{ij}^w - Q_{ij}^w \quad (2b)$$

$$\underline{H}_{il} \leq H_{i1} \leq \overline{H}_{il} \quad (2c)$$

$$\underline{Q}_{il} \leq Q_{i1} \leq \overline{Q}_{il} \quad (2d)$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall w \in W \quad (2e)$$

여기서 w 는 시계열을 의미하며, p^w 는 시계열의 발생확률, π 는 라그랑지안 승수이다.

이 모형에서는 의사결정 시점에서의 각 다목적댐 내수위 H_{i1} 만이 결정변수이므로 상대적으로 쉽게 풀이가 가능하다. 다른 부문제들은 각 예측 시계열별로 문제를 정의하게 되며 이를 모형으로 나타내면 다음과 같다.

$$L_w = \max_{H_{ij}^w} p^w \left(\sum_{j=2}^M \left(\sum_{i=1}^{NR} (c_1 P_{ij}(X_{ij}^w, H_{ij-1}^w, H_{ij}^w)) - \sum_{k=1}^{NSB} \max(c_2(D_{kj} - W_{kj}^w), 0) \right) + \sum_{i=1}^{NR} B_{iM}(X_{iM}^w, H_{iM-1}^w) - \sum_{i=1}^{NR} \pi_i^w H_{i1}^w \right) \quad (3a)$$

s.t.

$$S_{ij}^w = S_{ij-1}^w + X_{ij}^w - Q_{ij}^w \quad (3b)$$

$$\underline{H}_{il} \leq H_{ij}^w \leq \overline{H}_{il} \quad (3c)$$

$$\underline{Q}_{il} \leq Q_{ij}^w \leq \overline{Q}_{il} \quad (3d)$$

$$\forall i \in I, \forall j \in J, \forall k \in K, \forall w \in W \quad (3e)$$

위의 모형은 각 유입량 시계열에 따라 따로 정의되며, 이에 따라 상대적으로 쉽게 풀 수 있는 문제로 변환되었다. 변환절차에 따라 모두 $S+1$ 개의 부문제가 생성되었으며 이 문제들의 풀이기법으로는 Sequential Quadratic Programming(SQP)을 채택하였다.

또한 주문제의 모형을 나타내면 다음과 같다.

$$L^*(\pi) = \min_{\pi} (L_F + \sum_{w=1}^S L_w) \quad (4)$$

위의 부문제들의 라그랑지안 승수 π_i^w 는 주문제에서 계속적으로 갱신되며, 이 과정을 통하여 적절한 해를 찾게된다. 본 연구에서는 주문제는 제약조건이 없으므로 이를 푸는 방법으로 BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno) 기법을 채택하였다.

4. 실제유역에의 적용

본 연구에서는 개발된 모형을 금강유역에 적용하여 효용성을 검증하였다. 금강유역의 유로연장은 388.45km, 유역면적은 9,941.01km² 으로 대한민국에서 세 번째로 큰 규모이다. 해당유역에는 대청댐과 용담댐, 2개의 다목적댐이 건설되어 유역 내·외의 물 공급 및 전력발전, 홍수방어 등의 기능을 담당한다.

잔여편익함수의 매개변수산정을 위하여 과거 10년간의 자료를 이용하였다. 또한 예측유입량 시계열 생성을 위하여 강수량자료로는 총 10개 GCM 모형의 2020~2021년 자료를 이용하였으며, 이를 각 중권역별 유출률을 통하여 중권역별 유출량으로 변환하고 지형을 고려하여 다목적댐별 유입량을 산정하였다. 10개의 GCM은 편의보정기법을 이용하여 보정되었으며, 각 GCM별 발생확률 산정에는 log-normal 분포를 이용한 Bayesian model averaging(BMA) 기법이 적용되었다.

해당 기간의 경우 모든 모형에서 용수공급부족은 발생하지 않는 것으로 산정되었으며, 각 모형별 전력생산량은 다음 <표 1>과 같다.

표 1. 모형별 전력생산량 비교

구 분	확정론적 모형(MWh)	의사결정 평균모형(MWh)	제안된 모형(MWh)
2020.10	18,380	13,866	16,910
2020.11	21,827	16,883	19,863
2020.12	16,932	13,632	16,424
2021.1	12,617	10,428	11,986
2021.2	8,113	7,068	8,032
2021.3	8,591	7,588	8,248
2021.4	10,085	9,293	9,782
2021.5	14,196	12,227	14,054
2021.6	29,870	29,910	30,520
합 계	140,811	120,894	135,818

전력생산량의 경우 확정론적 모형, 제안된 모형, 의사결정 평균모형 순으로 많은 생산량을 보였다. 확정론적 모형의 경우 생성된 하나의 시계열이 정확하다고 가정한 모의이기 때문에 가장 큰 생산량을 나타내었으나, 불확실성을 전혀 고려하지 못한다는 단점이 있다. 제안된 모형은 확정론적 모형보다는 적은 양의 전력을 생산하였으나 의사결정 평균모형에 비해서는 많은 전력을 생산하였다. 이에 따라 제안된 모형이 예측유입량의 불확실성을 적절히 반영한 것으로 검토되었다. 또한 각 모형별 유수지내 수위변화양상 및 라그랑지안 완화기법의 도입으로 인한 쌍대격차 발생여부 확인은 그림 2와 같으며, 본 모형에서 쌍대격차는 발생하지 않는 것으로 검토되었다.

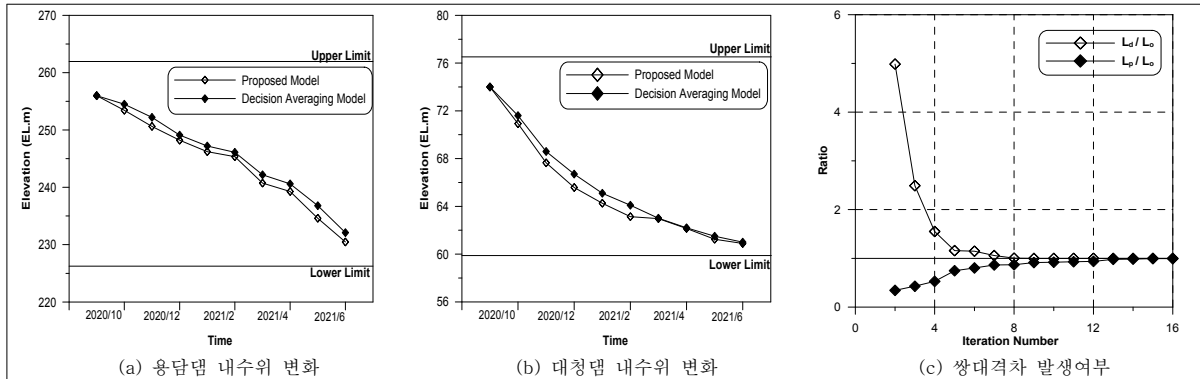


그림 2. 모형별 유수지 내수위변화 및 쌍대격차 발생여부 확인

5. 결론

본 연구에서는 예측유입량의 불확실성을 고려한 다목적댐 최적 연계운영 기법을 개발하였다. 최적 운영 방안을 결정하기 위해 비선형계획법을 이용함으로써 전력생산량이 가지는 비선형성을 적절히 제어하였으며, 의사결정 종료지점에서의 경계조건을 설정하여 운영시 모형의 의사결정종료 지점 이후 기간을 고려한 최적 운영결정을 할 수 있다. 또한 기후변화 시나리오의 경우 시나리오 자체가 많은 불확실성을 포함하고 있기 때문에 불확실성을 적절히 고려해 주어야 하는데, 본 연구에서 이를 적절히 고려할 수 있는 최적화 모형을 제시하였다. 또한 기후변화 시나리오의 발생확률 산정을 위하여 Bayesian model averaging(BMA) 기법을 이용하는 방안을 제시하였으며, 해공간의 복잡성을 줄이기 위하여 라그랑지안 완화기법을 도입하였다. 본 연구에서 제시된 모형의 경우, 라그랑지안 완화기법의 도입으로 인하여 쌍대격차가 발생할 가능성을 내포하고 있다. 이를 해석적으로 증명하는 것은 본 연구의 범위 밖이며, 수치적인 분석결과 쌍대격차가 발생하지 않는 것을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 건설기술혁신사업인 자연과 함께하는 하천복원기술개발 연구 (ECORIVER21)(06건설핵심B01)의 연구비 지원에 의해 수행 되었습니다

참고 문헌

1. Zhang, Y., Lansey, K. E., and Chiang, D. (1991). "Stochastic Optimization for Long Term Operation of Multiple Reservoirs: A New Approach." Proceedings of the 18th Annual Conference and Symposium, ASCE, New York, USA, 192-196.
2. Sloughter, J. M., Raftery, A. E., Gneiting, T., and Fraley, C. (2007). "Probabilistic Quantitative Precipitation Forecasting Using Bayesian Model Averaging." Monthly Weather Review, 135(9), 3209-3220.
3. Klau, G. (2007). "Lagrangian Relaxation: An overview." Lecture notes in Discrete mathematics in bioinformatics WS 07/08, Freire University Berlin, Germany.
4. Fisher, M. L. (1985). "An Applications Oriented Guide to Lagrangian Relaxation." Interfaces, 15(2), 10-21.