

저수지군 연계운업을 위한 표본 추계학적 선형 계획 모형 A Sampling Stochastic Linear Programming Model for Coordinated Multi-Reservoir Operation

이용대(Yongdae Lee)*·김승권(Sheung-Kown Kim)*

김재희(Jaehee Kim)**

* 고려대학교 산업시스템정보공학과

** 한국 철도기술 연구원

Abstract

본 연구에서는 저수지군 연계운업을 위한 표본 추계학적 선형 계획(SSLP, Sampling Stochastic Linear Programming) 모형을 제안한다.

일반적 추계학적 모형은 과거 자료로부터 확률변수의 확률분포를 추정하고 이를 몇 개 구간으로 나누어 이산 확률 값을 산정하여 기대값이 최대가 되는 운영 방안을 도출하지만, 저수지 유입량 예측시 고려되어야 할 지속성 효과(Persistency Effect)와 유역간 또는 시점별 공분산 효과(The joint spatial and temporal correlations)를 반영하는데 많은 한계가 있다. 이를 극복하기 위하여 과거자료 자체를 유입량 시나리오로 적용하여 시·공간적 상관관계를 유지하는 표본 추계학적(Sampling Stochastic)기법을 바탕으로 Simple Recourse Model로 구성된 추계학적 선형 계획 모형을 제시한다.

이 모형은 미국 기상청(NWS)에서 발생 가능한 유입량의 시나리오를 예측하는 방법인 앙상블 유량 예측(ESP, Ensemble Streamflow Prediction)을 통한 시나리오를 적용함으로써 좀더 신뢰성 있는 저수지군 연계운업 계획을 도출 할 수 있을 것으로 기대된다.

1. 서론

저수지군의 연계운영계획은 수계 내 각 저수지에 저류된 물과 앞으로 들어올 것으로 예측되는 유입량을 고려하여, 각 시점별 저류량 및 방류량을 결정하는 것이다. 효율적인 저수지군의 연계운영계획을 수립하기 위해서는 정확한 유입량 예측이 요구된다. 하지만 현실적으로 정확한 유입량을 예측하는 것은 불가능에 가까울 만큼 많은 한계를 갖고 있다. 이와

같은 현실 속에서 최적 연계운영 계획을 위한 연구로 확정론적 최적화 모형과 추계학적 모형에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

확정론적 모형은 앞으로 들어올 유입량을 안다는 가정하에 운영계획을 수립하는 것으로서, H-CoMOM 등의 모형이 실제 국내 저수지군 연계운업에 적용되고 있다. (김승권 등, 1998; 한국수자원공사 2001) 이와 같은 확정론적 모형은 복잡한 수자원 시스템의 운영 계획을 빠르게 도출할 수 있다는 장점이 있지만, 유입량의 불확실성을 고려하는데 많은 어려움이 따른다.

한편 추계학적 모형은 앞으로 들어올 유입량의 과거자료로부터 추정된 확률 분포를 갖는다는 가정하에 기대값이 최대가 되는 운영 계획을 수립하는 것이다. 이를 위하여 확률 분포를 몇 개 구간으로 나누어 이산 확률 값을 산정하고 기대값이 최대가 되는 운영 방안을 도출하지만, 저수지 유입량 예측시 고려되어야 할 지속성 효과(Persistency Effect)와 유역간 또는 시점별 공분산 효과(The joint spatial and temporal correlations)를 반영하는데 많은 한계가 있다. 이를 극복하기 위하여 과거자료 자체를 유입량 시나리오로 적용하여 시·공간적 상관관계를 유지하는 표본 추계학적(Sampling Stochastic)기법에 대한 연구가 활발히 진행 되어 왔으며(Kelman et.al, 1990;Faber et.al, 2001), 표본 추계학적 동적계획 모형(SSDP)이 우리나라 금강수계에 적용된 바 있다. (한국수자원공사, 2002) 하지만 표본 추계학적 동적 계획 모형은 유입량의 불확실성을 효과적으로 고려할 수 있지만, 동적계획법이 갖고 있는 "Curse of Dimensionality" 문제가 심각하여 복잡한 수자원 시스템에는 적용에 많은 한계가 있다.

본 연구에서는 이를 극복하기 위하여 과거자료 자체를 유입량 시나리오로 적용한 표본 추계학적(Sampling Stochastic)기법을 바탕으로 Simple Recourse Model로 구성된 표본

추계학적 선형계획(SSLP, Sampling Stochastic Linear Programming) 모형을 제시하고자 한다.

2. 모형의 수립

본 연구에서는 중장기 이수 운영 관점에서 과거 유입량 자료를 앞으로 각 저수지에 들어올 수 있는 유입량 시나리오라고 가정하여, 시스템운영 목표 측면에서 가장 기대값이 높은 월별 저류 계획을 도출 하도록 하는 표본 추계학적 선형 계획(SSLP) 모형을 수립하였다.

2.1 표본 추계학적 선형계획 모형

확정론적 선형계획 모형은 목적함수와 제약식으로 구성되며, 제약식을 준수하는 가운데 목적함수 값이 최대가 되는 해를 도출한다. 한편 추계학적 선형 계획 모형은 확정론적 선형계획 모형과 같이 목적함수와 제약식으로 구성되지만 확률 변수(Random Variable)가 추가되어, 확률변수를 고려했을 때, 목적함수의 기대값이 최대가 되는 해를 도출한다.

이때 추계학적 선형 계획 모형은 모든 시나리오에 대하여 제약식을 만족시키는 것을 보장하지 못하는 "feasibility" 문제가 존재한다. 즉 시나리오에 따라 제약식을 만족시키지 못하는 경우가 생길 수 있다. (Suvrajeet et. al, 1999). 저수지군 최적 연계운영 모형의 경우 유입량 시나리오에 따라 유량 하한에 속하는 유지용수를 맞추지 못하는 경우가 생기거나 유량 상한에 해당하는 관리 유량을 맞추지 못하는 경우가 발생하게 된다.

이와 같은 "feasibility" 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 Simple Recourse Policy를 적용한 Simple Recourse Model의 형태로 모형을 수립하였다. Simple Recourse Policy는 생산재고 관리 문제에서 Backlog가 발생했을 때 Shortage Costs를 부과하는 것과 같이, 제약식을 만족하지 못하는 경우에 벌점(Panalty Cost)를 부과하는 방법을 사용하였다. (Suvrajeet et.al, 1999)

한편 추계학적 선형 계획 모형은 확률변수의 분포를 추정하여야 한다. 하지만 일반적으로 확률변수인 저수지 유입량의 분포는 지속성 효과와 유역간 또는 시점별 공분산 효과를 반영하기 힘든 문제가 있다. 또한 추정된 확률분포를 몇 개 구간으로 나누어 이산 확률값을 산정한 후 최적화하여야 하는데, 이 과정은 문제의 복잡성이 높아지게 되며, 최적해의 도출을 보장할 수 없다. (Suvrajeet et.al, 1999)

이와 같은 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 과거자료 자체를 유입량 시나리오로

사용하는 표본 추계학적(Sampling Stochastic)기법을 적용하였다. 여기서 유입량 시나리오는 미래에 발생할 것으로 예측되는 유입량의 패턴으로서 이산화된 확률 분포의 한 형태라 할 수 있다. (Faber et.al, 2001) 이와 같은 표본 추계학적(Sampling Stochastic)기법을 적용함으로써 확률분포의 특성을 효과적으로 반영한 가운데, 쉽게 최적해를 도출할 수 있도록 하였다.

2.2 네트워크 모형의 수립

수계 내의 물의 흐름을 표현하기 위하여 그림 1 과 같이 네트워크 모형을 구성하였다. 네트워크 모형에서 정의된 각 시설(노드) 및 연결관계(아크)를 바탕으로 물의 흐름을 제어하고, 각 시설의 특성에 맞는 제약식을 추가하였다.

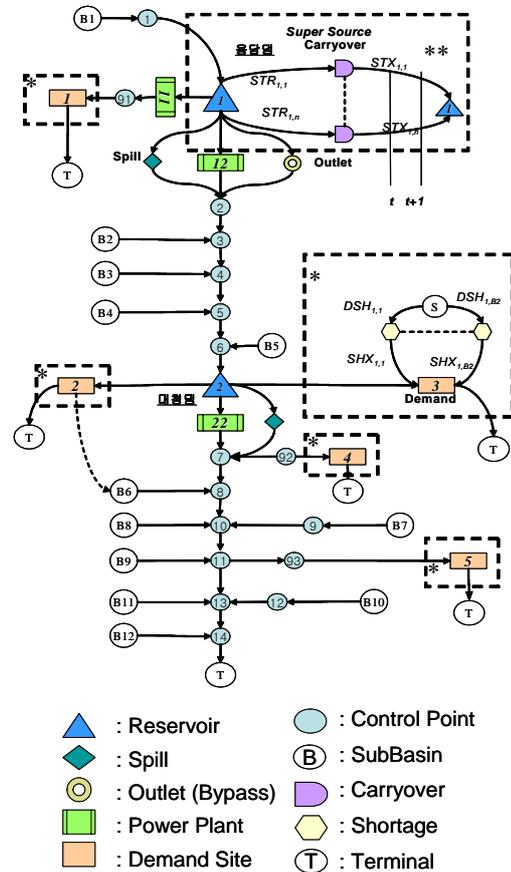


그림 1. 저수지군 연계운영을 위한 네트워크 모형(금강수계)

2.3 수확 모형의 수립

본 연구에서는 과거 수문곡선(유입량 자료)을 표본 유입량 시나리오로 사용한 표본 추계학적 선형 계획(SSLP) 모형을 수립하였다.

본 논문에서 제시한 수식은 수식이 표현하고자 하는 내용을 기술하는 식으로 한글로 단순화하여 표현하였으며, 상수는 기움필로

표시하였다. 여기서 k 인덱스가 붙은 변수는 N개의 시나리오 중 k번째 시나리오에 해당하는 변수임을 의미한다.

2.2.3 목적 함수

목적함수는 가중치를 부여하는 비용 및 수익 관련 목적과 벌점을 부여하는 Recourse 관련 목적으로 구성된다.

비용 및 수익 관련 목적은 저수량을 최대화 하여 미래 용수 수요에 대비하고, 발전량을 최대화함으로써 현재 수익을 증대시킨다. 그리고 무효 방류를 줄이기 위해 여수로 방류 및 출구 방류를 줄이며, 용수 수요를 최대한 만족시킨다.

한편 유입량 시나리오에 따라 유량 하한에 속하는 유지용수를 맞추지 못하거나 유량 상한에 해당하는 관리 유량을 맞추지 못하는 경우가 발생하게 되는 등 제약식을 만족하지 못하는 경우가 발생한다. Recourse 관련 목적은 이와 같이 제약식을 만족하지 못하는 경우에 대하여 벌점을 부여함으로써 제약식을 만족하도록 유도함으로써 제약식 내에서 해를 도출 하도록 한다. Recourse 관련 목적 및 변수는 굵은 글씨로 표현하였다.

$$\begin{aligned} & -ws[저수량] - \sum_{k \in N} we[발전량]^k \\ & + \sum_{k \in N} wsp[여수로방류량]^k \\ & + \sum_{k \in N} wo[출구방류량]^k \\ & + \sum_{k \in N} wds[용수공급부족량]^k \\ & + \sum_{k \in N} pcs[유지용수부족량]^k \\ \text{Minimize} & + \sum_{k \in N} pcol[관리유량초과량]^k \quad (1) \\ & + \sum_{k \in N} pso[여수로통수능초과량]^k \\ & + \sum_{k \in N} pool[방수구통수능초과량]^k \\ & + \sum_{k \in N} pis[유입량부족량]^k \\ & + \sum_{k \in N} pio[유입량과다량]^k \end{aligned}$$

2.2.4 제약식

(1) 흐름 상·하한 제약

■ 저수지

$$[저수량] \leq [저수상한] \quad (2)$$

$$[저수량] \geq [저수하한] \quad (3)$$

■ 조절점

$$[조절점 유입량]^k \leq [관리유량(흐름상한)] \quad (4)$$

$$[조절점 유입량]^k + [유지용수부족량]^k \geq [유지용수] \quad (5)$$

■ 발전소

$$[발전방류량]^k \leq [최대 사용수량] \quad (6)$$

■ 여수로

$$[여수로방류량]^k - [여수로통수능초과량]^k \leq [여수로통수능] \quad (7)$$

■ 출구(Bypass)

$$[출구방류량]^k - [방수구통수능초과량]^k \leq [방수구통수능] \quad (8)$$

(2) 흐름량 보전 제약

■ 저수지 흐름량 보전

$$[저수량(t)] + [총방류량]^k = [저수량(t-1)] + [총유입량]^k \quad (9)$$

$$[총방류량]^k = [발전방류량]^k + [여수로방류량]^k + [출구방류량]^k \quad (10)$$

$$[총유입량]^k = [자체유입량]^k + [상류유입량]^k + [유입량부족량]^k - [유입량과다량]^k \quad (11)$$

$$[저수량(t=0)] = [초기저수량] \quad (12)$$

■ 수요지 흐름량 보전

$$[용수공급부족량]^k + [용수공급량]^k = [수요량] \quad (13)$$

■ 조절점 흐름량 보전

$$[조절점방류량]^k + [용수공급량]^k = [조절점유입량]^k \quad (14)$$

$$[조절점유입량]^k = [자체유입량]^k + [상류유입량]^k + [유입량부족량]^k - [유입량과다량]^k \quad (15)$$

(3) 발전량 제약식

$$[발전량]^k = [발전효율]^k * \{ f*[수두] + h*[발전방류량]^k - f*h \} \quad (16)$$

$$[수두] = [저수량] - [방수위] \quad (17)$$

3. 모형의 적용 및 사례연구

본 연구에서 제시한 모형의 효과를 검증하기 위하여 금강 수계에 적용하여 결과를 실적 운영결과와 비교해 보았다. 금강수계에는 총 2개의 저수지와 3개의 발전소, 17개의 조절점, 3개의 수요지, 12개의 소유역 노드 등이 있으며, 우리나라 수계 중 비교적 단순한 구조를 갖고 있다.

모형 수행의 분석 기간을 2002년 10월 1일에서 2003년 9월 30일까지(2002수문년)의 1개 수문년으로 하여, 과거실적자료와 표본추계학적 선형계획모형(SSLP) 그리고 확정론적 선형계획모형(LP) 결과를 비교하여 보았다. 그 결과는 표1 및 그림 2 ~ 그림 3과 같다.

여기서 SSLP는 1981년 10월 ~ 2001년 9월(총 20개 수문년)의 유입량 시나리오를 이용하여 기대값이 최대가 되는 기간별 저수량을 도출한다. 하지만 이와 같이 도출된 저수량은 2002 수문년 유입량을 모른 채 도출된 결과로써, 2002 수문년의 유입량을 적용할 경우 달성되는 운영 결과는 모의운영(Simulation)을 통하여 계산하여야 한다. 이

모의운영은 최소·최대 가능 방류량 등 시스템 운영제약을 지키는 가운데 SSLP에서 도출된 저수량을 준수하도록 운영한 결과이다. 표1 및 그림 2 ~ 그림 3의 SSLP는 이와 같은 모의운영을 수행한 결과이다.

한편 LP의 결과는 유입량을 안다는 가정 하에 수행된 결과이다.

그 결과는 표 1에서 보는 바와 같이 저수량은 모형 결과가 실적운영보다 감소하지만 발전량은 증가하며, 여수로 방류량이 감소함을 알 수 있다. 여기서 SSLP와 LP의 저수량이 낮은 이유는 여수로 방류를 최소화하기 위하여 저수량을 낮춘 것으로 판단된다.

그리고 용담댐과 대청댐의 저수 운영 패턴은 그림1 ~ 그림2 와 같다.

표 1. 모형 수행 결과와 과거 실적치 비교 (2002.10~2003.9)

		용담	대청	합계	증감
평균 저수량 (MCM)	실적치	542	934	1,476	-
	LP	566	869	1,435	-3%
	SSLP	559	905	1,464	-1%
발전량 (GWH)	실적치	215	350	565	-
	LP	255	342	597	6%
	SSLP	242	346	588	4%
여수로방류 + 구방류 (MCM)	실적치	926	1,763	2,689	-
	LP	789	630	1,419	-47%
	SSLP	796	886	1,682	-37%

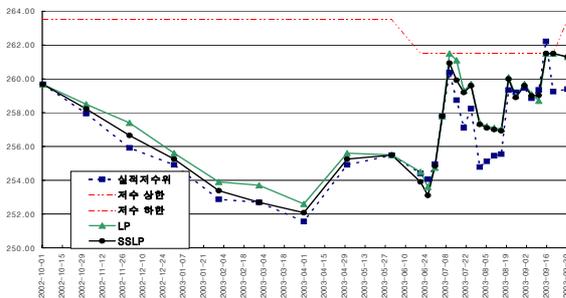


그림 2. 용담댐 운영 결과 비교

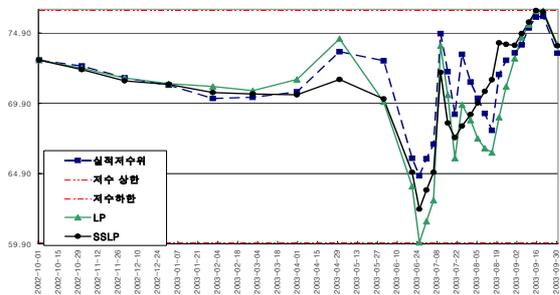


그림 3. 대청댐 운영 결과 비교

한편 SSLP는 ILOG CPLEX 7.0를 이용하여 최적해를 도출하였으며, 1개 수문년(총 28개 기간)에 대하여 20개년의 시나리오를 적용하였을 때, Windows 2003 Server를 기반으로 하고, Intel Pentium 4 3.0 GHz, 2GB

RAM을 장착한 PC에서 소요시간이 약 7~8 초 정도에 최적 해를 도출 하였다.

4. 결론 및 향후 연구 과제

본 연구에서는 저수지군 최적 연계운영 계획 수립을 위하여 표본 추계학적(Sampling Stochastic)기법을 바탕으로 Simple Recourse Model로 구성된 추계학적 선형 계획 모형을 제시하였다. 그리고 제시된 모형을 금강수계 연계운영에 적용하여 현실적인 결과를 도출하였다.

하지만 금강수계의 실적 연계운영 자료의 부족으로 인하여 1개 수문년 밖에 적용하지 못하는 등 검증 과정이 부족한 점이 있다. 또한 금강 수계는 우리나라에서 비교적 단순한 수계로서 좀더 복잡하고 장기간의 연계운영 자료가 있는 한강수계와 같은 다른 수계대안 적용 및 검증이 요구된다.

한편 본 연구에서는 유입량 시나리오를 과거 자료를 사용하였는데, 미국 기상청(NWS)에서 발생 가능한 유입량의 시나리오를 예측하는 방법인 앙상블 유량 예측(ESP, Ensemble Streamflow Prediction)을 적용한다면 좀더 신뢰성있는 저수지군 연계운영 계획을 도출 할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 21세기 프론티어연구개발사업인 수자원의 지속적 확보기술개발사업단의 연구비 지원(과제번호 1-6-1)에 의해 수행되었습니다. 그리고 모형 개발 및 수행에 사용된 ILOG 소프트웨어를 고려대학교에 기증해 주신 KSTEC에 감사드립니다.

참고 문헌

1. 김승권, 박영준(1998), "댐군의 연계운영을 위한 수학적 모형", 한국수자원학회논문집, 제 31권 제6호, pp 779-793
2. 한국수자원공사(2001). "수력 발전댐의 다목적화에 따른 효과분석연구용역 보고서"
3. 한국수자원공사(2002). "낙동강수계 댐군 최적 연계운영시스템 개선 연구 보고서"
4. Faber, B. A., and Stedinger, J.R.(2001), "Reservoir optimization using sampling SDP with ensemble streamflow prediction(ESP) forecasts" Journal of Hydrology, Vol. 249, No. 1-4, pp. 113-133
5. 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.26, No.2, pp. 447-454
6. Suvrajeet Sen and Julia L. Hagle(1999), "An Introductory Tutorial on Stochastic Linear Programming Models", Interfaces, Vol. 29, No. 2, pp. 33-61