

선형결정규칙과 추계학적 동적계획법을 이용한 저수지 규모결정 및 운영

○위희상¹⁾ · 이재웅²⁾

1. 서론

저수지 시스템을 설계하거나 운영할 때 수문학적, 수리학적, 경제적, 환경적, 정치적 불확실성을 고려해야 한다. 수문학적 불확실성은 주로 강우와 같은 추계학적인 물리량이기 때문에 이로 인하여 발생하는 하천유량, 증발, 침투 등과 같은 수문량도 수문학적 불확실성을 포함하고 있다. 이러한 수문량은 시간에 따라 변화하는 추계학적인 변수들이기 때문에 수문학적 불확실성을 분석하여 저수지 규모결정이나 운영에 포함시킨다면 실제 운영에서 발생할 수 있는 위험성의 발생을 억제할 수 있을 것이다.

선형결정규칙을 이용한 확률제약모형이 ReVelle 등(1969)에 의해서 최초로 도입되어 비선형인 추계학적 최적화문제를 푸는데 선형계획법 알고리즘의 사용을 가능하게 하였다. Eisel(1970), Loucks(1970)등은 선형결정규칙의 도입에 대하여 의문을 제기하기도 하였지만 확률제약모형이 저수지 설계와 운영에 대한 예비적 해석에 적합한 모형이라는데는 이견이 없었다. 국내에서는 한강수계의 복합댐에 선형결정규칙을 사용하여 모의발생기법에 의한 최적 저수지 운영을 시도한 바 있다(이길성 등, 1985).

대부분의 수공구조물이 경제적인 목적을 위해 재현기간에 추정한계치를 고려하여 확정론적으로 설계되기 때문에 설계규모에 제한을 받는 경우가 있다. 그러나 수문현상은 예측할 수 없는 불확실성을 가지고 있으므로 추계학적 방법은 확정론적 방법보다 불확실성의 범위를 감소시킬 수 있는 객관적인 대안이 될 수 있을 것이다. 실제 적용 예를 살펴보면 소양강댐과 충주댐의 연계운영에 발전용량을 극대화하는 목적함수를 이용하여 추계학적 동적계획법을 적용(김택수, 1989)한 바 있고, 과거의 유입량 자료와 모의발생된 유입량 자료를 토대로 확률수준에 따른 최적 저수위구간을 양해 추계학적 동적계획법으로 산정하고 이때 회귀분석을 통하여 유도된 식을 월별 저수지 운영율로 제시한 연구가 있다(고석구 등, 1997).

본 연구에서는 저수지의 규모를 결정하기 위하여 수문학적 불확실성을 고려한 선형결정규칙을 이용한 확률 제약 모형을 구성하였으며, 결정된 저수지의 운영방안을 제시하기 위하여 양해 추계학적 동적계획법을 이용한 모형을 구성하였다.

1) 아주대학교 공과대학 토목설계공학과 석사과정

2) 아주대학교 공과대학 토목설계공학과 조교수

2. 선형결정규칙과 추계학적 동적계획법

2.1 선형결정규칙

저수지의 최적 규모를 결정하기 위해서 목적함수로 편익을 최대화하는 문제를 고려할 수 있다. 저수지의 건설로 인한 편익은 그 종류가 다양하지만, 문제를 간략화하기 위하여 본 연구에서는 편익의 최대화는 단순히 저수지 건설에 따른 비용을 최소화함으로서 얻을 수 있다고 가정한다. 즉, 저수지의 유효용량 S 를 최소화하면 최대 편익을 구할 수 있으므로 목적함수는 다음과 같다.

$$\text{Minimize } S \quad (1)$$

확률 제약 모형에서 추계학적 변수들을 포함하는 제약조건들은 확률항들로 바뀌게 되는데, 확률항을 수학적으로 적용하는 것이 쉽지 않으므로 확률 제약조건들을 각각에 상응하는 확정론적 제약조건들로 전환해야 한다. 저수지의 확률 제약 모형은 일반적으로 정해진 신뢰도 수준에서 두 종류의 제약조건을 가지고 있다. 첫째는 저수지 저류량의 허용범위에 대한 제약조건이고, 둘째는 저수지 방류량의 허용범위에 대한 제약조건이다. 저류량과 방류량에 대한 제약조건들은 운영기간 동안 허용범위를 초과하지 않을 확률을 포함하는데 저류량과 방류량에 대한 조건들은 식(2), 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P [ST_t \leq S] \geq \alpha_{ST_t} \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2)$$

$$P [U_{\min,t} \leq U_t \leq U_{\max,t}] \geq \alpha_{U_t} \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (3)$$

여기서 $U_{\min,t}$ 와 $U_{\max,t}$ 는 각각 기간 t 동안의 최소, 최대 방류량이고, α_{ST_t} 와 α_{U_t} 는 각각 저류량과 방류량 제약조건에 대한 특정 신뢰도이다. S 는 결정해야 하는 저수지 용량, ST_t 는 기간 t 동안의 저류량, P 는 확률항을 나타내는 연산자이다. 저수지 규모와 운영모형에서 선형결정규칙은 방류량과 저류량, 유입량, 결정매개변수들을 선형적으로 연관시키는 규칙으로, 그동안 수자원관련 분야에서 적용되었던 선형결정규칙에는 여러종류가 있으며, 본 연구에서는 식(4)와 같은 선형결정 규칙을 사용하였다.

$$U_t = ST_t + I_t - EV_t - b_t \quad (4)$$

여기서 I_t 와 EV_t 는 각각 기간 t 동안에 저수지로의 유입량과 저수지로부터의 증발량이고, b_t 는 기간 t 의 결정매개변수로서 미지항이다. 식(4)와 연속방정식을 고려하여 식(5)와 같은 확률 제약 저수지 운영을 위한 결정규칙을 유도할 수 있다.

$$ST_{t+1} = ST_t + I_t - EV_t - U_t = b_t \quad (5)$$

식(5)에서 기간 t 에 대한 결정 매개변수 b_t 가 기간 t 종료시의 저류량 ST_{t+1} 과 같으므로, t

초기의 저류량 ST_1 는 기간 $t-1$ 종료시의 저류량과 동일하여, $ST_t = b_{t-1}$ 의 관계가 성립하고 이를 식(4)에 대입하면 다음의 식(6)을 얻을 수 있다.

$$U_t = I_t - EV_t - b_t + b_{t-1} \quad (6)$$

하지만 기간 t 초기에 t 기간 동안의 유입량 I_t 와 증발량 EV_t 를 알 수 없으므로 U_t 도 알 수 없다. 증발량의 영향은 유입량의 영향에 비하여 작으므로 무시할 수 있다고 가정하면, 유입량의 추이를 관찰하면서 식(5)와 식(6)에 의해 방류량과 저류량을 결정할 수 있다. 식(4)로 정의된 선형 결정규칙에 의한 저류량 제약조건 $ST_t \leq S$ 는 결정 매개변수를 사용하여 식(7)과 같이 쓸 수 있다.

$$S - b_{t-1} \geq 0 \quad (t = 1, 2, \dots, T) \quad (7)$$

저수지 용량 S 는 항상 양수이므로 식(7)에서 변수 b_1, b_2, \dots, b_T 가 양수이면 저류량 제약조건과 비음 제약조건을 동시에 만족시킬 수 있다.

$$b_t \geq 0 \quad (t = 1, 2, \dots, T) \quad (8)$$

저류량 제약조건은 식(7)에서 추계학적 변수들을 포함하지 않는 확정론적 제약조건이므로, 저류량 확률 제약조건 식(2)를 식(7)로 바꿀 수 있다. 방류량 확률 제약조건은 식(6)을 식(3)에 대입하여 얻을 수 있다.

$$P [U_{\min,t} \leq I_t - b_t + b_{t-1} \leq U_{\max,t}] \geq \alpha_{U_t} \quad (9)$$

식(9)에서 추계학적 변수는 기간 t 동안의 유입량 I_t 이다. 기간 t 동안의 하천 유입량의 통계적 특성은 기왕의 자료들을 분석하여 얻을 수 있다. 방류량 확률 제약조건 식(9)는 상한, 하한값 제약조건이 있고, 우변항 계수 I_t 만이 추계학적 변수이므로 미지값 $\alpha_{U_{\max}}$ 와 $\alpha_{U_{\min}}$ 을 균등한 확률수준으로 분배하면 함수제약조건식은 식(10), 식(11)과 같다.

$$b_t - b_{t-1} \geq -U_{\max,t} + \mu_{QF,t} + Z_{\frac{(1+\alpha)}{2}} \sigma_{QF,t} \quad (10)$$

$$b_t - b_{t-1} \leq -U_{\min,t} + \mu_{QF,t} - Z_{\frac{(1+\alpha)}{2}} \cdot \sigma_{QF,t} \quad (11)$$

여기서 $\mu_{QF,t}$ 와 $\sigma_{QF,t}$ 는 기간 t 동안에 유입량의 평균과 표준편차이고 $Z_{(1+\alpha)/2}$ 는 $(1+\alpha)/2$ 의 누적확률에 대한 빈도계수값으로 유량의 확률분포를 안다면 주어진 특정 신뢰도 α_{U_t} 에 대하여 그 값을 얻을 수 있고 이를 이용하여 저수지 규모를 산정할 수 있다.

2.2 추계학적 동적계획법

저수지의 운영에서 유입량간의 연속 상관성 때문에 어느 단계의 유입량 확률분포는 전 단계의 유입량 확률분포와 상관되어 있다. 저수지의 최적운영을 고려하는 문제에서 저수지 상태방정식의 구성요소인 유입량의 추계학적 특성을 시계열 상에서 이산화된 천이확률로 처리하여 목적함수를 최대화(또는 최소화)하는 양해 추계학적 동적계획법에 적용할 수 있다. 전단계의 실제 유입량 Q_i 가 발생했을 때 변수들을 일정하게 분할하여 단계 i 일 때 추계학적 유입량 변수를 I 개의 이산구간 $I_{i,1}, I_{i,2}, \dots, I_{i,k}, \dots, I_{i,K}$ 으로 차별화시키고, 현단계를 K 개의 분할구간으로 나누어 각각의 운영단계에서 이산구간에 대응하는 발생확률을 천이확률 행렬로 나타내면 $P_{i,1}, P_{i,2}, \dots, P_{i,k}, \dots, P_{i,K}$ 라는 조건부 확률분포를 산정할 수 있다. 이를 고려하여 양해 추계학적 동적계획법의 후진형 순환방정식을 식(12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$F_i(I_{i-1}, X_i) = \min(\text{or max}) \left\{ \sum_{k=1}^K P[(I_{i,k} | I_{i-1})] \cdot [f_i(X_i, X_{i+1}, U_i, I_{ik}) + F_{i+1}(X_{i+1,k}, I_{i,k})] \right. \\ \left. U_i(\text{or } X_{i+1}) \right\} \quad (12)$$

여기서, $i=1, \dots, N$ 은 총 단계수, $k=1, \dots, K$ 는 무작위 변수의 총 분할수, $I_{i,k}$ 는 단계 i , 분할수 k 에서 무작위 변수, $\sum_{k=1}^K P[I_{i,k} | I_{i-1}]$ 는 이전의 I_{i-1} 발생 조건하에서 $I_{i,k}$ 의 발생확률로서 각각의 운영단계에서 전 단계의 유입량 이산구간별 확률의 합계는 1이다. 양해 추계학적 동적계획법을 이용하면 운영단계의 유입량을 정확히 예측할 수 없는 현실에서 전단계의 유입량과 적용단계의 저류량만을 이용하는 저수지 운영률의 개발이 가능할 것이다.

3. 모형의 적용

3.1 선형결정규칙을 이용한 저수지 규모결정

본 모형의 적용을 위하여 시범유역으로 강원도 양양 남대천 유역을 선정하였다. 강원도 양양 남대천 유역의 1987~1997년까지 11년 동안의 월평균 수위자료를 건설교통부에서 발간하는 한국수문조사연보(건설교통부, 1987~1997)에서 얻었고, 남대천의 수위유량곡선식을 사용하여 유량으로 환산하였다. 기왕의 월 유입량 자료는 χ^2 적합도 검정 결과 신뢰도 99% 수준에서 대수정규분포를 따름을 확인하였다. 댐건설 후보 지역인 어성전리 용탄교 지점의 유역 면적비와 강우량비를 적용하는 비유량 분석 방법을 통해 환산한 월 평균 대수 유량자료의 평균, 표준편차 등을 선형결정규칙을 사용하여 대수정규분포의 신뢰도 99% 수준에서의 확률 제약조건 모형을 구성하였다.

매달의 저류량 확률 제약조건과 비음제약조건은 식(7)과 식(8)로부터 주어진다. 신뢰도 $\alpha=99\%$ 수준에서 방류량 확률 제약조건은 식(10), 식(11)과 같이 나타낼 수 있다. 식(10)과 식(11)에서 μ_{QF} , σ_{QF} 는 1987년~1997년까지의 1월~12월에 대한 유량을 각각 대수로 변환하여 구한 t 기간의 평균, 표준편차를 대입하고, 신뢰도 99%에 대한 정규분포의 빈도계수에 대한 값을 대입하여 시계열 모형을 구성하였다. 증발량은 저수지로의 직접강우와 서로 상쇄된다고 가정하여 무시하였

다. 기간 t 동안 저수지의 월간 최소 방류량은 과거 11년간의 남대천 월 평균유량으로 작성한 유량지속곡선의 비초과 확률 95~99%에 해당하는 유량인 0.1MCM을 적용하였고, 최대방류량은 남대천 인근의 양양군, 속초시, 고성군의 2011년 예상 용수수요(한국수자원공사, 1996)와 하천유황을 분석하여 35MCM으로 설정하였다.

저수지 용량 S 를 최소화하는 모형을 풀기 위하여 선형계획법을 사용하였다. 선형결정규칙 모형은 36개의 제약조건, 14개의 변수를 가지고 있으며, 산정한 결과 51.6MCM이라는 규모를 얻을 수 있었다. 즉, 선형결정규칙을 이용한 확률 제약모형의 대수정규분포 신뢰도 99% 수준에서 51.6MCM의 단일 가상 저수지 용량이 결정되었다.

3.2 추계학적 동적계획법을 이용한 저수지 운영결정

선형결정규칙을 사용하여 결정된 51.6MCM 용량의 저수지를 남대천에 가정하고, 주기성 시계열 유입량자료의 각 단계별 천이확률을 계산하기 위하여 각 단계의 확률변수의 추정치를 예상하였다. 천이확률분석은 11년간의 남대천의 과거 유량자료를 이용하여 PAR(1) 모형에 의해 모의발생된 200년간의 유입량자료를 차분하여 천이 행렬을 구성하고 이산화된 월별 유입량의 빈도수를 총 자료수로 나누어 산정하였다. 모형의 목적함수는 기대 방류량과 용수수요의 차를 최소화하는 것이며, 저류량 제약조건은 3.1절에서 결정된 0~51.6MCM, 방류량 제약조건은 0.1~35MCM으로 정하였다. 그림 1은 대표적인 풍수기인 8월과 갈수기인 12월의 이산 유입량 구간별 저수지의 저류량을 통해 월초의 저수지 저류량에 의해 월말 저수지의 목표저류량을 제시하는 저수지 운영방안을 보여주고 있다. 12월의 저수지 운영방안은 전 달의 유입량에 따라 비교적 규칙적인 양상을 보이고 있지만 8월의 저수지 운영방안은 비교적 불규칙한 양상을 보이고 있다. 이는 양양 남대천 유역의 하절기 유황의 변동이 매우 크기 때문인 것으로 판단된다. 이 저수지 운영방안에 의하여 월초에 월말 목표저류량이 설정되면 그 달의 유입량에 따라 탄력적으로 방류량을 조절할 수 있으며 불필요한 방류를 줄여 저수지 운영관리의 효율을 증대 시킬 수 있을 것이다.

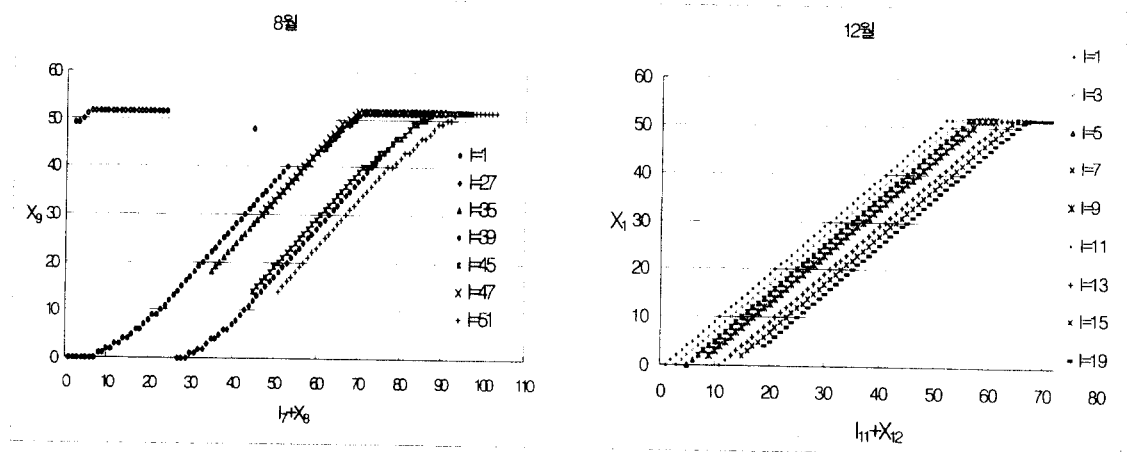


그림 1 천이확률에 의한 저수지의 예상 저류량

4. 결 론

수문학적 불확실성을 고려하여 강원도 양양 남대천 유역의 2011년 원활한 용수수급과 최대편익을 위하여 가능한한 최소용량을 갖는 저수지의 규모를 결정하고, 추계학적 동적계획법을 이용하여 저수지의 운영률을 예측하였다. 시험유역인 양양 남대천에 저수지 건설 가능지점을 조사하여 선정된 후 저수지로의 유입량을 분석하고 선형결정규칙을 사용한 확률제약모형을 구성하여 51.6 MCM의 저수지 규모를 산정하였다. 확률 제약 모형에서 선형결정규칙을 적용하여 저수지 용량을 구하면 특정 신뢰도를 만족시키는데 필요한 저수지 용량보다 다소 크게 나오는 경향이 있지만, 확률 제약모형은 수문자료의 추계학적 특성을 포함하여 신뢰성을 높일 수 있다는 장점을 가지고 있다. 양해 추계학적 동적계획법을 통한 저수지 운영률 분석은 장기간의 각종 수문자료가 필요하지만 양양 남대천 유역에는 1개의 수위관측소만이 존재하며 관측도 1987년 이후에 시작되어 자료의 양도 충분하지 못한 형편이다. 추계학적 분석기법에 의해 개발된 운영률은 우리나라의 시계열 특성상 자기상관성이 적은 풍수기에는 전 구간에 대하여 명확한 해를 산출하지 못한 점도 있으나 대부분의 평수기와 갈수기에는 전 단계 유입량과 현 단계 저류량의 추계학적인 특성만으로 저수지 운영방안을 제시해줌으로써 유입량에 따라 월초 저류량에 대응하는 월말 목표저류량의 예측을 통해 저수지의 방류량 조절이 가능함을 알 수 있었다.

5. 참고문헌

1. 건설교통부 (1987~1997), 한국수문조사 연보.
2. 건설교통부 (1999), 지표수-지하수 연계운영 시스템 개발, pp. 196-217, 258-273.
3. 고석구, 이광만, 이한구 (1997), "양해 추계학적 동적계획법에 의한 저수지 운영률 개발" 한국수문학회지, 제30권, 제3호, pp. 269-278.
4. 김택수 (1989), 댐군의 이수운영을 위한 추계학적 DP, 공학석사 학위논문, 서울대학교.
5. 이길성, 정동국 (1985), "홍수시 충주댐 운영방안의 비교검토", 한국수문학회지, 제18권, 제3호, pp. 225-233.
6. 한국수자원공사 (1996), 수자원개발 가능지점 및 광역배분계획 기본조사 보고서.
7. Eisel, L. M. (1970), "Comments on 'The Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design.' by C. Revelle, E. Joeres and W. Kirby", WRR, 6(4), pp. 1239-1241.
8. Loucks, D. P. (1970), "Some Comments on Linear Decision Rules and Chance Constraints", WRR, 6(2), pp. 668-671.
7. Larry W. Mays and Yeou-Koung Tung (1992) Hydrosystems Engineering and Management, McGraw-Hill, Inc, pp. 305-312.
8. Revelle C., E. Joeres and W. Kirby (1969), "Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design : 1. Development of the Stochastic Model", Water Resour. Res. Vol.9, No.1, February.