

선형추적에 의한 한강수계 복합 저수지 계통의 이수 조작기준 작성

Development of Han River Multi-Reservoir Operation Rules by Linear Tracking

유 주 환*
Yoo, Ju Hwan

Abstract

Due to the randomness of reservoir inflow and supply demand it is not easy to establish an optimal reservoir operation rule. However, the operation rule can be derived by the implicit stochastic optimization approach using synthetic inflow data with some demand satisfied. In this study the optimal reservoir operation which was reasonably formulated as Linear Tracking model for maximizing the hydro-energy of seven reservoirs system in the Han river was performed by use of the optimal control theory. Here the operation model made to satisfy the 2001st year demand in the capital area inputted the synthetic inflow data generated by multi-site Markov model. Based on the regressions and statistic analyses of the optimal operation results, monthly reservoir operation rules were developed with the seasonal probabilities of the reservoir stages. The comparatively larger dams which would have more controllability such as Hwacheon, Soyanggang, and Chungju had better regressions between the storages and outflows. The effectiveness of the rules was verified by the simulation during actually operating period.
keywords : reservoir operation rule, hydro-energy optimization, linear tracking, optimal control, multi-reservoir

요 지

불확실한 저수지 유입량과 수요량 때문에 최적의 저수지 조작기준은 정량화하기 쉽지 않다. 그렇지만 저수지 조작에 일정 수요를 충족시키면서 모의 발생시킨 유입량 시계열을 반영함으로써 음해 추계적 최적화 접근법을 이용하면 조작기준은 작성 가능하다. 이에 본 연구에서는 한강수계 7개 저수지 계통에 적절하도록 수력발전 최대화를 선형추적으로 모형화하고 최적제어를 이용하여 최적조작을 수행하였다. 이 때 2001년 수도권 용수수요를 만족시키도록 한 최적 조작 모형에는 다지점 마코브 모형에 의해 모의 발생된 유입량 자료가 입력된다. 그리고 최적 결과에 대하여 회귀 분석과 통계 분석을 수행하여 월별 조작기준을 작성하고 계절별 저수위별 확률을 제시하였다. 이때 상대적으로 저수용량이 커서 조절능력이 좋은 화천댐, 소양강댐, 충주댐은 저류와 방류의 회귀 관계가 잘 형성되었다. 작성된 조작기준으로 실제 운영 기간동안에 대하여 모의조작을 수행하여 그 효율성을 검증하였다.

핵심용어 : 저수지 조작기준, 수력발전 최적화, 선형추적, 최적제어, 복합 저수지

* 영동대학교 건설공학부 전임강사
Full-time Lecturer, Dept. of Civil Engineering, Div. of Construction Engineering, Youngdong Univ., Seolgye-ri San 12-1, Youngdong, Chungbuk, 370-701, Korea (E-mail : jhyoo@youngdong.ac.kr)

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

인구 증가 및 산업 발달 등으로 물 수요는 증가하는 반면 수질은 오히려 나빠져서 수자원의 희소적 가치가 날로 커져 가고 있다. 이런 관점에서 수자원 이용의 고도화와 수자원의 합리적 최적관리는 수자원 개발 투자의 공공성을 비추어 볼 때 국가 경제적으로 중요하다. 특히 물은 순환적 특성을 가지므로 유역 내에서 유출되는 수자원을 시간 또는 공간적으로 최적관리하여 이용하면 그 편익은 누적되지만 그렇지 못해서 발생하는 손실은 회복될 수 없다. 이와 같은 동적 특성을 갖는 수자원의 공급 시스템인 저수지 계통의 조작용은 매우 중요하기 때문에 적절한 저수지 조작기준(operation rule)을 마련하기 위한 노력이 계속되어 왔다. 여기서 개발된 조작기준은 수자원 계획 또는 관리를 위한 의사 결정 지원 체계(decision making support system)의 기초가 될 수 있다.

초창기 저수지 조작에 관한 의사결정에 쓰인 전통적인 수단은 기준곡선 또는 조작곡선(rule curve)이다. Linsley와 Franzini(1979)의 정의에 의하면 이 기법은 계절별로 유지해야 할 저수지의 수위 또는 용량을 정해 놓거나 그 범위를 나타내 준다. 이때 불확실성을 갖는 저수지 유입량에 대하여 일정 수준의 실패 위험도를 수용해야 할 만큼 저수지 관리 또는 운영은 수자원 관리상 가장 복잡한 문제이다. Maass 등(1962)과 Young(1967)에 의해 도입된 종래의 조작기준은 간편한 방법이지만 목적 지향적인 댐조작에는 미흡한 점이 있다. 그후 모의기법 및 최적화 기법 등 수학적 기법이 저수지 조작에 활발히 적용되면서 수학적 프로그램에 의하여 조작기준을 개발해 왔다. 이와 같은 저수지 조작은 유입량 등 추계적 특성의 반영 방법에 따라 크게 양해 추계적 방법(explicit stochastic approach)과 음해(implicit) 추계적 방법으로 나눌 수 있다. 양해법은 유입량 등의 추계적 특성을 저수지 조작에 반영하는 방법으로 마코브 연쇄법칙(Markov chain rule)과 같은 통계적인 이론에 따라서 목적함수 등에 직접 반영하는 접근법이다. 이 연구에는 Kelman 등(1990), Tejada-Guibert 등(1993)의 성과가 있다. 음해법에는 저수지 조작의 최적화 사례로서 Evenson과 Moseley(1970), Jettmar와 Young(1975) 등의 성과가 있다. 이때 양해법에서 통계적 특성은 가설적인

모집단과 기록치를 통계적으로 검증하여 얻은 계절 또는 공간적인 정상성(stationarity)을 갖기 때문에 양해법은 통계 검증의 유의 수준이나 정상성 등에 큰 영향을 받는다. 반면에 음해법은 추계적 통계 특성을 직접 모형에 반영하지 않는 간접적인 방법이지만 실제 기록치를 추계적 시계열로 반영하는 확정적(deterministic) 방법이기에 때문에 실제 발생한 극한 시계열에 대한 결과 분석 등에 유리하다. 또한 음해법은 양해법보다 대용량 저수지에 적합하다는 연구 결과도 있다(Karamouz와 Houck, 1987). 이와 같은 음해 추계적 최적화 방법은 회귀분석(regression)과 모의방법(simulation)을 함께 이용함으로써 보다 적합한 조작기준을 찾는 데 이용되고 있다(Bhaskar와 Whitlatch, 1980 ; Karamouz 등, 1992). 최근에는 간편한 자료의 화상출력(display)과 모의(simulation)모형을 이용하는 접근 사례(Lund와 Ferreira, 1996)도 있다.

한편 복합 저수지 시스템을 최적 관리 또는 운영 기준을 마련하기 위한 성과에는 Georgakakos(1989), McLaughlin과 Velasco(1990), Mizyed 등(1992), Crawley와 Dandy(1993), Martin(1995), Yang 등(1995)에 의한 성과가 있다. 최근에는 Oliveira와 Loucks(1997)는 복합 저수지 조작에 대한 최적화 성과의 중요성을 강조하고 유전자 조사기법(Genetic search algorithm)을 적용하여 저수지 시스템과 각 저수지의 운영방안을 모색하였다. 그밖에 Askew(1974), Hue(1987), Chung 등(1988)도 여러 가지 형태의 저수지 조작 방안을 제시하였다.

국내 사례로 권오헌과 박용근(1986)은 18년간 기록 유입량을 갖는 한강수계 댐군에 용수공급을 최대화하는 소양호의 기준곡선을 작성한 성과가 있고 이희승 등(1992)은 계절별 유입량과 저류수준에 대한 방류량을 회귀분석하여 충주댐의 조작기준을 개발하였다. 권오헌 등은 섬진강수계의 복합시스템인 주암-이사천댐 계통에 대하여 최적 연계 운영결과를 분석하여 계절 특성과 차기 유입량 예측에 근거하는 조작기준을 개발하였다(한국수자원공사, 1992). 그리고 한강수계내 저수지 조작기준 개발로는 충주댐 계통을 최적 조작하여 충주다목적댐 조작기준을 개발한 사례(한국수자원공사/수자원연구소, 1992)가 있다. 고석구 등(1997)은 유입량의 추계적 특성을 저수지 조작의 목적함수에 직접 반영한 양해 추계적 동적계획기법(Explicit Stochastic Dynamic Programming)을 이용하여 충주댐 계통의 조작기준을 개발하였다. 이 연구에서는 추계적 동적계

획기법이 모형 설계상의 처리시간과 기억용량의 제한을 받지만 추계적 유입량에 효과적으로 대응하기 위하여 3년간의 월별 유입량의 이산화 천이확률을 적용하였다.

본 연구에서는 추계적 유입특성을 간접적으로 반영시키는 음해 추계적 방법을 이용하고 최적화 기법은 선형추적(Linear Tracking) 모형(유주환 등, 1999)을 이용하여 한강수계 복합 저수지 시스템을 조작하였다. 이 시스템에서 화천댐, 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐은 발전 목적으로 상시발전을 하고 소양강 및 충주 다목적댐은 홍수조절 및 용수공급 등의 기능을 갖는 동시에 침투 수력발전 기능도 함께 한다. 따라서 이수 측면에서 용수공급을 충족시키는 한도 내에서 수계 댐군 계통이 수력발전 생산을 최대화하도록 하는 것이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 복합 저수지 조작을 통하여 수계 전체의 용수공급 및 수력발전 편익이 최대가 되도록 운영목적을 달성하기 위해서 용수수요 충족을 제약조건으로 반영하고 최대 발전이 일어나는 정격수위를 따르도록 하는 선형추적 모형을 설계하고 장기간의 모의 유출에 대하여 저수지 조작을 수행하여 최적 결과를 분석함으로써 제어력이 있는 화천댐, 소양강댐, 충주댐에 대하여 저류량 및 유입량과 방류량의 관계로부터 조작기준을 작성하였다. 그리고 이를 이용하여 복합 저수지 계통을 모의운영하여 조작기준의 효과를 검증하였다. 이 모형은 현재 발전 전용댐과 다목적댐의 관리가 이원화되어 있고 운영기준 또한 분리되어 있는 상황에서 직접 이용하기엔 무리가 있지만 전체계통의 일원화 또는 연계 운영이 가능한 경우에 활용가능할 것이다.

1.2 연구범위 및 제한점

본 연구의 목표는 설계 홍수조절 기능을 유지하고 이수측면에서 최대 편익을 얻을 수 있는 저수지 조작 기준을 설정하는데 있다. 그리고 현재 한강수계내 저수지 계통의 수자원 이용 상황 등을 고려하여 용수공급은 제약조건으로 우선 반영하고 수력발전을 조작의 목적으로 설정하였다. 그리고 수질보전 및 휴양 등의 친수 기능은 하천 유지유량 및 저수량 제약으로 반영할 수 있는 부대조건으로 취급하였다. 이때 수력발전 측면에서 댐별 혹은 댐 전체 발전량, 발전시간, 보장 발전량 등으로 최적화의 기준함수를 설정할 수 있다. 본 연구에서는 계통 전체의 발전 편익을 극대화하기 위해서 댐 전체 발전량을 최대화하도록 하였다. 이때 댐별

가중치는 저수지 용량에 따른 일정치를 적용하였다. 따라서 최적화 결과는 실제 발전과는 차이가 있다. 이는 저수지 관리상 우선 순위 또는 가중치에 따라 복합 저수지에 적절히 적용할 수 있을 것이다. 그리고 추계적 특성을 갖는 저수지 유입량은 저수지 관리 기록(한국 전력공사, 1995)을 이용하였고 이때 월별 유입량은 대수 정규분포로 확률분포를 검정하여 5% 유의수준에서 채택되어 다계절 다지점 마코브 모형을 이용하여 유입량 자료를 확장하였다. 수요 또한 추계적인 특성을 갖지만 본 연구에서는 이 추계성은 반영치 않았다. 다만, 수자원장기종합계획상(1990)에 제시된 2001년도 수요 기준년도의 연간 수요량을 수도권의 월별 수요비로 공급하는 것으로 하였다(유주환, 1998). 그리고 조작 결과를 분석하여 제어력이 있는 화천댐, 소양강댐 및 충주댐의 조작기준을 저류량 및 유입량과 방류량의 관계식으로 작성하고 관계가 잘 형성되지 않는 소규모 발전댐은 일정 방류량을 적용하여 통합 저수지 모형을 구현하였다.

2. 조작기준 작성

수자원 그리고 전력 에너지의 수요와 홍수 조절의 필요성 등이 증대됨에 따라 유역내 저수지 수가 증가하여 수계내 저수지 계통은 복합적이고 유기적인 특성을 갖는다. 이때 저수지의 조작기준은 저수지 계통의 전체 효율성이 증대되도록 마련되어야 한다. 본 연구에서는 그림 1과 같이 국내에서 인구나 산업이 가장 밀집되어 있는 한강 수계의 복합 저수지 계통을 대상으로 수계 특성에 적합하도록 용수수요를 우선 충족시키고 수력 발전을 극대화할 수 있는 이수 조작기준을 작성하였다. 이 조작기준은 댐 운영 또는 수자원 관리를 위한 의사결정지원체계(DSS)의 주요 부분으로 포함될 수 있을 것이다. 그림 2는 한강 수계내 7개의 저수지 계통으로 직렬과 병렬 계통이 함께 포함된다.

2.1 조작기준

Lund와 Ferreira(1996)의 언급에서와 같이 저수지 조작 방법은 크게 두 가지로서 저수공간을 목적별로 분할하여 계절별 유량에 따라 공급하는 방안과 댐 저류량 및 유량 크기에 따라 댐별 방류 기준을 정하는 일정한 기준을 설정하는 기법이 있다. 첫 번째는 초장기 저수지 조작 기술인 기준곡선 개념이라고 할 수 있고 두 번째로는 최적화 또는 수학적 모형을 이용한 조작기준이다.

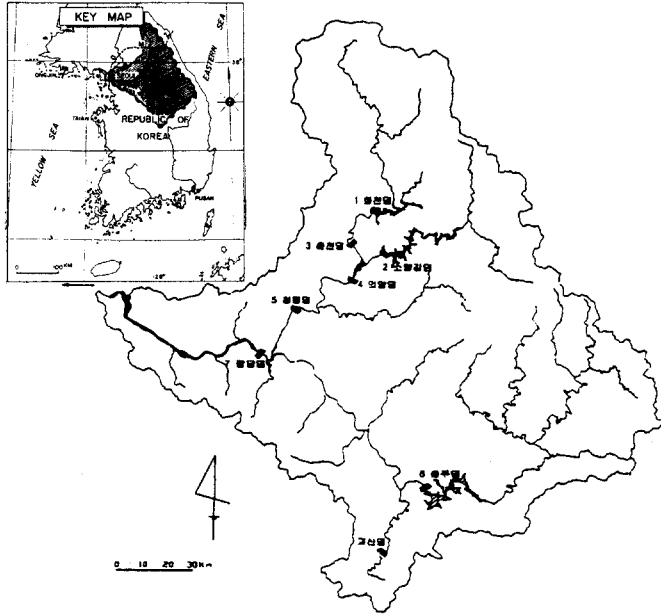


그림 1. 한강 유역도

2.1.1 작성 개요

저수지 조작기준의 작성 과정으로는 우선 선형추적 모형을 통하여 복합 저수지 시스템 조사를 수행하고 이 결과를 통하여 댐별 저수위 및 유입량과 방류량을 분석하여 각 댐별 조작기준을 작성하고 저수량의 확률 또한 제시한다. 이 기준을 바탕으로 복합 저수지 계통 조작 모형을 구성하여 조작기준의 효과를 검증한다.

2.1.2 조작 모형

본 연구에서는 한강수계 복합 저수지 시스템을 대상으로 하여 용수를 기본적으로 공급하고 이때 수력발전을 최대화하고 무효방류를 최소화할 수 있도록 하는 다음 식 (1)과 같은 저수지 조작모형을 설정하고 이를 선형추적에 의하여 저수지 조사를 최적화한다(유주환 등,1999).

$$\begin{aligned}
 J_{aug.} = & \frac{1}{2} \| \mathbf{X}(N) - \hat{\mathbf{X}}(N) \|^2 V + \sum_{k=0}^{N-1} \left\{ \frac{1}{2} \| \mathbf{X}(k) - \hat{\mathbf{X}}(k) \|^2 Q + \frac{1}{2} \| \mathbf{u}(k) \|^2 R \right. \\
 & + \Delta^T(k+1) [\Phi \mathbf{X}(k) + \Psi \mathbf{u}(k) + \Phi \mathbf{y}(k)] \\
 & \left. - \Delta^T(k+1) \hat{\mathbf{X}}(k+1) \right\} \quad (1)
 \end{aligned}$$

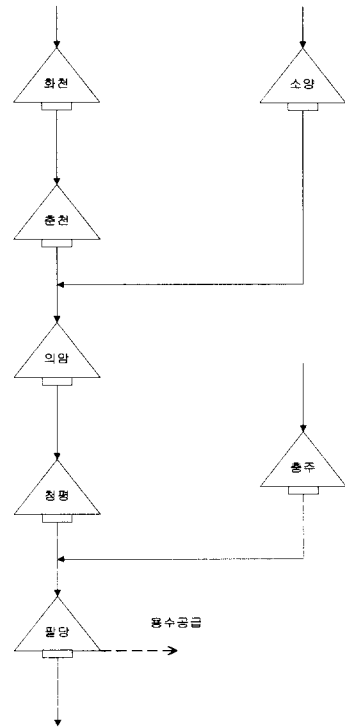


그림 2. 저수지 계통도

$$\mathbf{X} \leq \mathbf{X}(k) \leq \mathbf{X}+(k) \quad (2)$$

$$\mathbf{u} \leq \mathbf{u}(k) \leq \mathbf{u}^+ \quad (3)$$

이때 J_{aug} 는 확장방정식(augmented equation)을 나타내고 $\mathbf{X}(k)$ 는 시간 k 단계 저류수준(상태벡터), $\mathbf{u}(k)$ 는 k 단계 방류수준(제어벡터), $\mathbf{y}(k)$ 는 k 단계 유입 변수로 유입량에서 취수량과 증발량 등을 뺀 량이다. 여기서 취수량은 용수 공급량이 된다. 그리고 $\hat{\mathbf{X}}$ 는 최대 발전이 가능한 정적 저류수준을 나타내는 벡터이고 λ 는 라그랑지 승수(Lagrange multiplier)를 나타낸다. 그리고 Φ, Ψ 는 댐의 공간적 위치 등의 시스템 특성을 나타내는 매트릭스이다. 여기서 최종 시간 단계는 N 으로 나타낸다. 변수제약 조건에서 $+$, $-$ 는 각각 최대, 최소를 나타낸다. Q, R, V 는 정방형 매트릭스로서 상태벡터, 제어벡터, 경계조건에 대하여 계통 내에서 댐별 기준치를 나타낸다.

2.1.3 입력 자료

(1) 유입량

조작기준에 가장 결정적인 영향을 주는 것이 추계적 특성을 갖는 유입량이다. 이 때문에 저수지 조작에서 유입량은 중요한 요소이다. 한편 신뢰성있는 조작기준을 작성하기 위해서는 다수의 조작 자취가 필요하다. 이를 위해서 유출의 통계적 정상성을 유지한 다수의 유입량 자료가 요구된다. 이에 본 연구에서는 댐별 자기유역 유입량(1974-1994)은 관리기록으로부터 산정하였고 유입량을 통계적으로 합성(synthesis)하여 입력자료를 확장하였다(유주환, 1998). 이때 계절적 특성과 공간적 상관성을 고려하여 연중 월단위 12개월 7지점 마코브 모형을 적용하였고 가용한 21년간 월 유입량의 확률분포는 5% 유의수준에서 분포검증하여 대수 정규분포로 채택하였다. 그리고 자료의 상관도(correlogram)를 분석한 결과, 래그 2 이상에서 상관계수가 0.2이하로 떨어지므로 자기회기 모형 중에 래그 1 인 마코브 모형을 선택하였다. 이를 계산하기 위해서 다지점 마코브 모형인 MPAR1(Ko, 1989)을 이용하였다. 여기서 래그는 시계열상의 지체(lag)를 나타낸다. 이와 같이 하여 100년간의 월 유입량을 발생시켰고 발생된 모의 유량의 평균, 표준편차, 왜곡도 등을 21년 기록치와 비교하여 접근성을 확인하고 저수지 조작에 적용하였다.

(2) 기타

저수지 조작과 수력 발전량 계산 등에 필요한 댐 계획 및 발전 자료는 댐 관리 기관이 보유하는 설계 및 관리 자료를 이용하였다(유주환, 1998). 용수수요는 2001년도 기준(수자원장기종합계획, 1990)의 생공용수($6,911 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{년}$)를 팔당댐 지점에서 우선 공급하도록 모형의 제약조건으로 반영하였다. 변환행렬인 Φ 와 Ψ 는 본 시스템 특성값으로 적용하였고 R, Q, V 행렬은 시스템의 수력 또는 발전 등 시스템 특성을 나타내고 평가함수 식에서 상태변수, 제어변수, 경계조건에 대한 분산을 최소화함에 있어서, Riccati 해의 에너지 집중도를 좌우하므로 시행착오 및 민감도 분석을 통하여 최적치를 적용하였다(유주환, 1998).

2.1.4 저수위 분석 및 기준곡선

(1) 저수위 분석

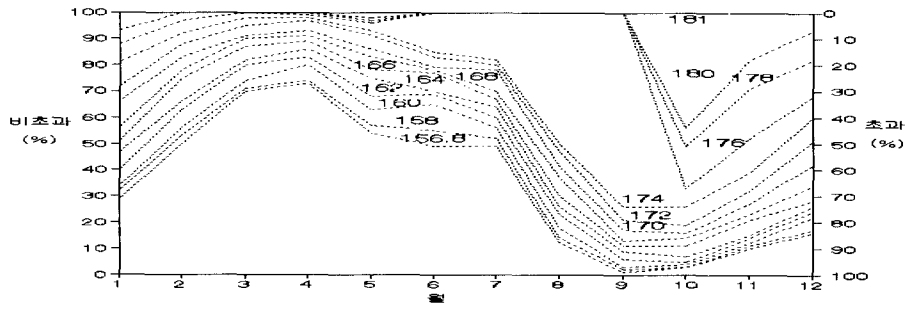
이수측면에서 저수지의 수위는 이수 능력 또는 공급 능력을 판가름할 수 있는 간접적인 지표가 될 수 있다. 따라서 본 연구에서는 저수지 조작에서 저수량의 수준을 평가할 수 있는 통계적인 기준으로서 계절별 수위의 확률을 제시한다. 이때 유입량과 수요량의 월별 계절 특성을 감안하여 저수위 또한 월별로 확률을 제시하였다. 이와 같은 통계 분석에는 적합한 확률 분포가 요구되지만 저수위 계획은 모형의 평가함수를 최적으로 운영하려는 인위적인 추세성 때문에 확률적인 무작위성(randomness)을 갖지 않으므로 이론적인 확률분포를 도입하지 않고 식 (4)와 같은 Weibull 공식을 통하여 최적 추세성을 포함하는 확률을 구하였다.

$$P(X \leq x_m) = F(x_m) = \frac{m}{n+1} \quad (4)$$

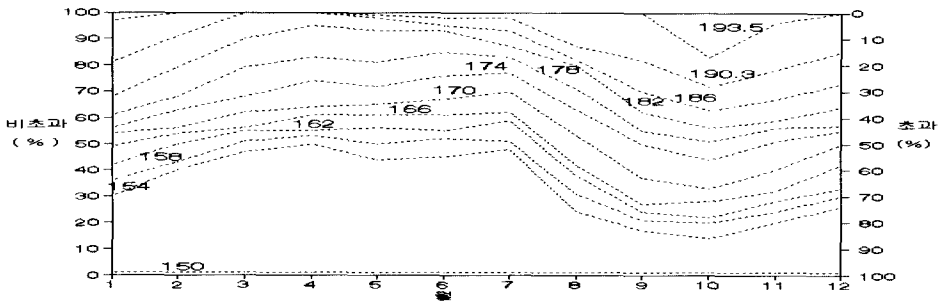
$$P(X > x_m) = F_e(x_m) = 1 - F(x_m) \quad (5)$$

여기서, $P(X \leq x_m)$ 는 저수위 X 가 x_m 보다 같거나 작을 확률이고, $F(x_m)$ 는 저수위가 x_m 을 초과하지 않을 비초과 확률이고 $F_e(x_m)$ 는 저수위가 x_m 보다 클 초과 확률을 나타낸다. 이때 x_m 은 m 번째 저수위, m 은 저수위 오름차 순서번호(1, 2, ..., n)이고 n 은 저수위 자료수이다. 이때 저수위가 B_j 보다 작거나 같을 확률은 다음 식 (6)과 같다.

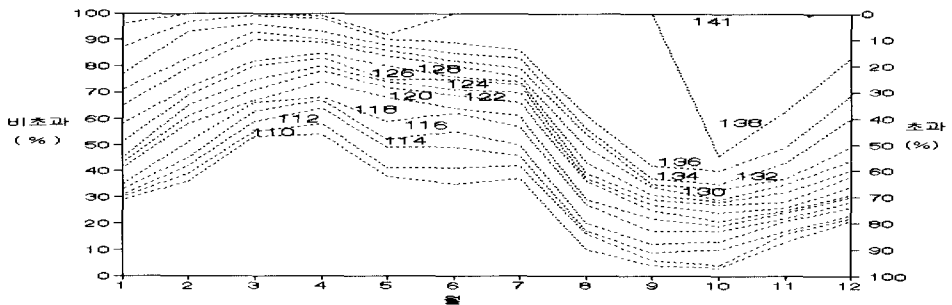
$$\alpha(B_j) = P[X \leq B_j] = F[B_j] = \alpha_j \quad (6)$$



(a) 화천댐



(b) 소양강 댐



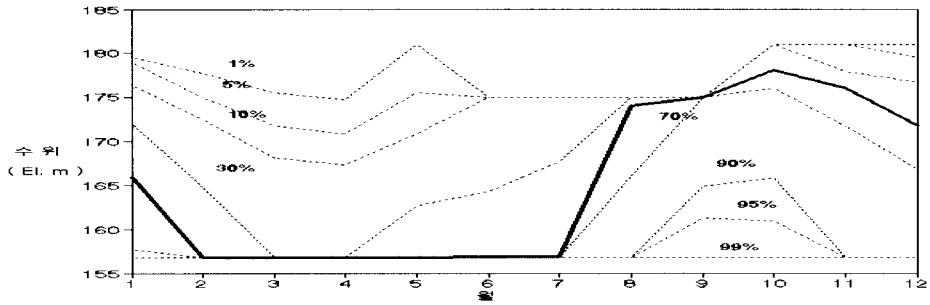
(c) 충주댐

그림 3. 저수위 월별 패턴

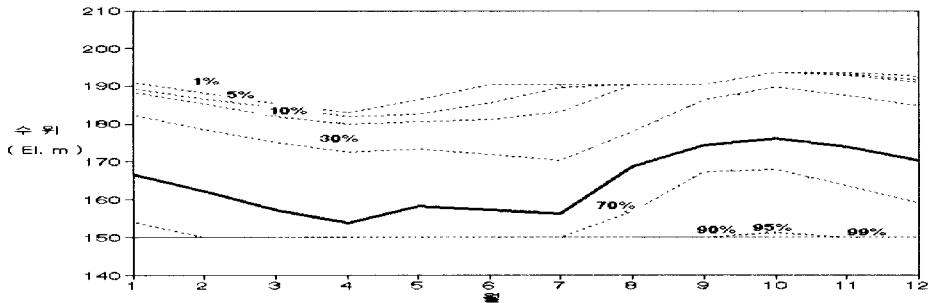
여기서 a_j 는 j 계절에 저수위 B_j 보다 낮은 확률을 나타낸다. 이때 j는 계절 단위로써 월을 나타낸다. 그림 3은 화천댐, 소양강댐, 충주댐의 저수위별 초과 확률과 비초과 확률을 나타낸다. 이것은 월별로 수위의 발생빈도를 나타낸다.

(2) 기준곡선

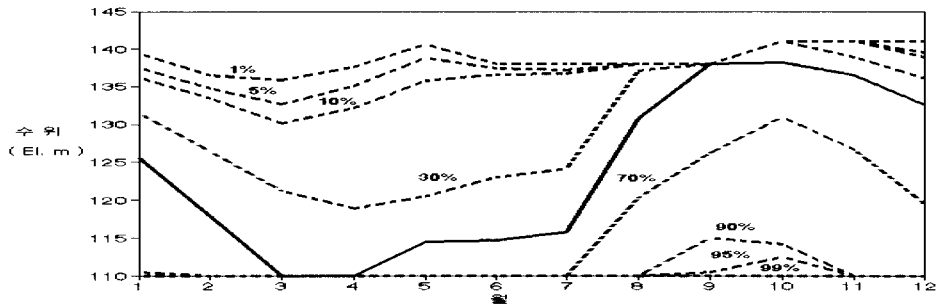
유입량이 월별 계절성을 가지므로 저수위 수준은 그림 4와 같은 자취를 나타낸다. 그림에서 저수위 자취 중에 굵은 실선은 평균적인 저수위 패턴을 나타낸 것이다. 그리고 곡선상의 수치는 저수위가 그 수위보다 높을 확률을 나타낸다. 그림 4에서 보는 바와 같이 화



(a) 화천댐



(b) 소양강댐



(c) 충주댐

그림 4. 저수위 자취

천댐은 소양강댐, 충주댐에 비하여 2월에서 7월에 저수위가 낮게 나타난다. 이는 최적화 결과가 상대적으로 소양강댐, 충주댐에 비중이 실려 있음을 보여 준다.

2.2 조작기준 작성

저수지 관리 및 운영은 복합적인 목적을 갖기 때문

에 다수의 모의조작이나 최적 저수지 조작을 수행하여 조작기준을 작성해야 한다. 조작기준은 저수지마다의 특성이 다르므로 일정한 형식으로 정의할 수는 없지만 일반적으로 조작기준은 댐에서 방류량(u)을 식 (7)과 같이 크게 저류상태(X)와 유입량(I) 및 수요 특성(D)의 함수로 나타낼 수 있다.

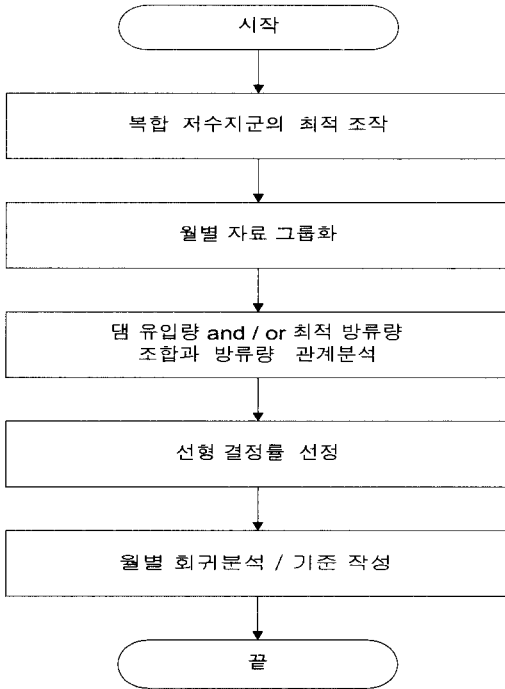


그림 5. 조작기준 작성과정

$$u(k) = f(X, I, D, J) \quad (7)$$

여기서, f 는 조작기준을 나타내는 함수로 물리적인 특성과 저수지 운영 특성을 반영하고, $u(k)$ 는 k 기간

중 의사결정량이고, X 는 저류량 특성으로 저수지의 조작기간 초 또는 말 저류수준이고, I 는 유입량으로 저수지 상류에서 제측가능하다. 그리고 D 는 용수 수요량이고 J 는 k 의 수년(hydrologic year)의 계절성을 나타낸다.

본 연구에서는 장기간의 계통 최적 조작으로부터 결정된 저류량, 유입량, 수요량 등의 관계를 조합하고 분석하여 가용저수량(available storage)인 저류량과 유입량의 합계와 방류량의 관계를 선형함수(이희승 등, 1992)로 설정하였다. 즉 저수지 운영상 방류량 결정은 추계적 특성을 갖는 유입량에 대하여 시스템에 최대편의를 갖도록 해야 하므로 본 연구에서는 최적화 결과에서 저류량과 유입량 등을 월별로 조합하여 방류량과 관계를 분석한다. 이와 같은 조작기준 작성 과정은 그림 5와 같다. 이때 조작기준 형식으로 식 (8)과 같은 선형결정률은 적용상의 편의성을 갖는다.

장기간의 복합 저수지 최적조작 결과로서 전체 시스템의 조작에서 그림 6과 같이 저류용량이 비교적 큰 화천댐, 소양강댐, 충주댐은 시스템 내에서 우월한 제어력을 갖기 때문에 댐 방류량과 저류 및 유입량의 관계 패턴이 뚜렷하다. 반면에 소규모댐은 Run-of-river댐과 같이 저류기능이 상대적으로 작으므로 댐 방류량과 저류 및 유입량의 관계가 잘 형성되지 않는다.

유입량에 대하여 방류량을 결정할 수 있는 조작기준으로서 저수량과 유입량의 합계는 가용저수량으로서

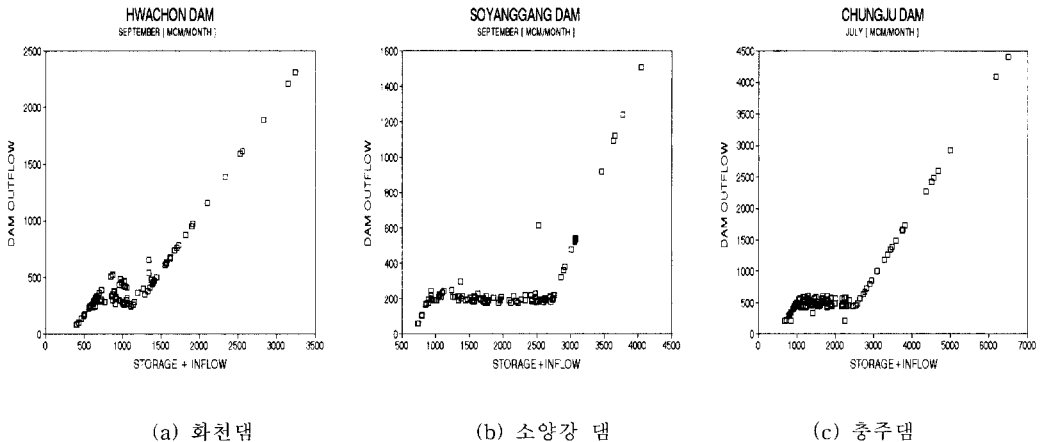


그림 6. 조작패턴

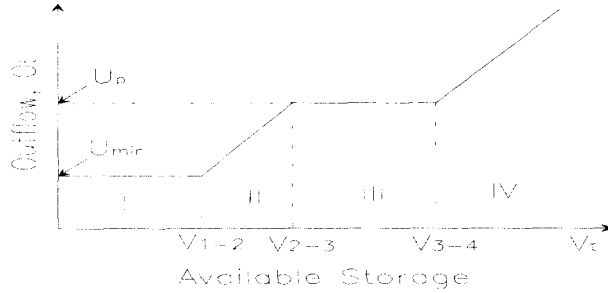


그림 7. 구간별 조작기준

방류량(outflow)의 관계는 선형식 (8)과 같이 설정하였고 이때 상수 **A**와 **B**는 회귀분석하여 결정하였다.

$$O_t = AV_t + B \quad (8)$$

여기서, O_t 는 기간 t월 저수지 방류량($10^6 m^3$), V_t 는 기간 t월 저수지 가용수량($X_t + I_t$, $10^6 m^3$), X_t 는 기간 t월 저수량($10^6 m^3$), I_t 는 기간 t월 유입량($10^6 m^3$)이다.

조작 기준식은 그림 7과 같이 가용저수량에 따라 4 구간을 형성한다. 여기서 최소 방류량과 발전 방류량은 2개의 일정방류 상태를 형성한다. 즉 그림에서 U_p 는 발전 방류 특성을 나타내고 U_{min} 는 최소 방류량이고 V_{i-j} 는 i와 j구간의 천이점이다. 이 기준식은 각 댐별로 월별 계절단위로 작성하였다. 화천댐, 소양강댐, 충주댐의 조작 기준식은 표 1과 같다. 이때 구간별 불연속성을 피하기 위해서 인접구간의 회귀영역을 중복시켰다.

2.3 조작기준 검증

7개 저수지 시스템의 공동운영 기간 9년(1986~1994)간에 운영모형을 통하여 모의조작한 결과는 표 2와 같다. 그 결과, 충주댐 및 팔당댐을 제외한 모든 댐에서 실적치(한국전력공사, 1995)보다 발전량이 1.1~1.5배 정도 신장되었다. 충주댐은 실적치보다 50%가 작았고 팔당댐은 30% 작게 나타났는데 이는 용수수요 기준년을 2001년으로 설정한 영향과 전체시스템의 발전총량을 최대화한 원인 때문이다. 즉 이때 전체 시스템이 수력발전 정격수위를 유지하도록 최적 제어하는데 각 댐별 가중치는 저수량의 크기를 감안하여 일정치를 부여하였기 때문에 전체 발전량은 증대되었지만 각 댐별 실적치와의 비교는 차이가 있을 수 있다고 판단된다. 이는 시스템내의 댐별 가중치 설정에 따라 달

라질 수 있다. 즉 전체 계통에 대하여 댐별 우선 순위 또는 가중치 부여에 대한 의사결정에 따라서 발전특성이 달라질 수 있다. 한편 본 모형에 의한 1986년부터 1994년까지 수력발전 생산량은 당기간 실적 수준이면서 2001년도 용수 수요를 충족시키는 것으로 나타났다.

3. 조작기준의 적용 방안

현실적으로 발전 전용댐과 다목적댐의 관리가 이원화되어 발전댐은 상시 발전하고 다목적댐은 침투 발전한다. 이러한 상황과 달리, 장래 댐 및 저수지 시스템 전체가 일원화되거나 유기적인 관계가 형성되어 전체 계통의 수력발전 및 용수공급 등 이수 목적을 최적화하는 통합 저수지 조작이 가능한 여건이 조성된 경우를 전제로 한다면 작성된 조작기준은 복합 저수지 계통의 통합 운영 모형에 이용될 수 있다. 한편 저수지 운영은 연간 계획을 바탕으로 월간 계획을 수립하고 일별로 시행된다. 본 연구에서는 이수 계획 측면에서 한강수계 저수지 계통의 월간 조작기준을 작성한 것이다. 즉 월간 댐 유입량 크기에 따라 월간 방류량을 결정하는 기준을 설정한 것이다. 따라서 월간 조작기준은 근본적으로 월간 계획을 수립하는데 이용될 수 있을 것이다. 다만 이 기준은 일별 조작의 시행 및 계획에서 매월 말의 저수지 운영 기준 정보로 활용할 수 있을 것이다. 이때 월 조작기준 정보를 일별 저수지 운영에 적용하는 구체적 활용 방안은 저수지 유입량 등의 수문적인 특성과 댐별 운영 지침을 고려하여 보다 심도 있게 연구되어야 할 것이다.

4. 주요 결론

저수지 조작기준은 가용저수량과 방류량의 관계 패

표 1. 저수지 조작기준

월	구간	화천댐				소양강댐				충주댐			
		적용영역 (10 ⁶ m ³)	A	B	표준오차 (10 ⁶ m ³)	적용영역 (10 ⁶ m ³)	A	B	표준오차 (10 ⁶ m ³)	적용영역 (10 ⁶ m ³)	A	B	표준오차 (10 ⁶ m ³)
1	I	0~410	0	85.5	0	0~736	0	59.9	0	0~704	0	207.4	0
	II	410~592	0.977	-320.2	2.6	736~893	0.901	-603.2	5.6	704~1028	0.935	-448.2	16.5
	III	592~908	0.038	241.3	56.8	893~2534	0.005	189.9	13.6	1028~2880	0.009	479.6	46.0
	IV	908~1678	0.437	2.5	0	2534~3004	0.970	-2261.7	8.0	2880~3757	1.000	-2352.0	0.0
2	I	0~410	0	85.5	0	0~729	0	59.9	0	0~673	0	207.4	0
	II	410~592	0.963	-314.0	3.4	729~926	0.776	-511.9	10.8	663~926	0.907	-421.6	13.4
	III	592~908	0.038	241.3	56.8	926~2534	0.002	194.5	19.2	926~2880	0.002	461.8	36.3
	IV	908~1678	0.437	2.5	0	2534~3004	0.970	-2261.9	8.0	2880~3757	1.000	-2352.0	0.0
3	I	0~418	0	85.5	0	0~746	0	59.9	0	0~705	0	207.4	0
	II	418~592	0.999	-333.1	0.1	746~900	0.958	-655.7	4.2	705~932	0.996	-498.4	0.7
	III	592~908	0.038	241.3	56.8	900~2534	0.004	191.4	14.0	932~2540	0.015	422.6	15.8
	IV	908~1678	0.437	2.5	0	2534~3004	0.970	-2261.9	8.0	2540~6501	0.999	-2091.3	0.5
4	I	0~419	0	85.5	0	0~742	0	59.9	0	0~704	0	207.4	0
	II	419~619	0.996	-333.5	0.7	742~911	0.904	-611.1	5.0	704~924	0.969	-477.2	7.2
	III	619~908	0.324	72.7	23.8	911~2534	0.000	196.4	14.0	924~2537	0.011	429.8	19.5
	IV	908~1678	0.437	2.5	0	2534~3004	0.970	-2261.9	8.0	2540~6501	0.999	-2091.3	0.5
5	I	0~417	0	85.5	0	0~747	0	59.9	0	0~697	0	207.4	0
	II	417~614	0.999	-333.7	0.3	747~892	0.998	-686.8	0.3	697~932	0.994	-496.7	2.1
	III	614~1007	0.111	177.1	42.3	892~2531	0.004	191.5	13.7	932~2537	0.016	424.8	20.3
	IV	1007~1689	0.868	-537.4	35.7	2534~3004	0.970	-2261.9	8.0	2540~6501	1.000	-2091.3	0.5
6	I	0~418	0	85.5	0	0~748	0	59.9	0	0~704	0	207.4	0
	II	418~609	0.999	-333.0	0.2	748~917	0.977	-670.9	3.2	704~926	0.995	-497.6	1.0
	III	609~1007	0.264	110.0	31.3	917~2534	0.011	180.6	16.8	926~2540	0.026	424.3	25.8
	IV	1007~1689	0.868	-537.4	35.7	2534~3004	0.970	-2261.9	8.0	2540~6501	1.000	-2091.3	0.5
7	I	0~414	0	85.5	0	0~748	0	59.9	0	0~704	0	207.4	0
	II	414~599	0.962	-314.3	4.4	748~908	0.953	-650.8	5.3	704~941	1.000	-501.6	0.0
	III	599~1096	0.261	128.4	65.4	908~2335	0.002	197.4	15.1	941~2540	0.007	489.3	54.8
	IV	1079~5419	0.995	-723.2	19.6	2335~3715	0.936	-2136.8	57.7	2540~6501	1.000	-2091.3	0.5
8	I	0~415	0	85.5	0	0~748	0	59.9	0	0~704	0	207.4	0
	II	415~641	0.930	-293.8	7.0	748~900	0.845	-555.3	8.7	704~960	1.000	-501.4	0.0
	III	641~1079	0.113	227.8	44.0	900~2557	0.001	199.5	15.1	960~2573	0.013	484.1	52.0
	IV	1079~5429	0.995	-723.2	19.6	2557~5155	0.995	-2328.5	10.7	2573~6364	0.998	-2083.6	7.1
9	I	0~415	0	85.5	0	0~745	0	59.9	0	0~704	0	207.4	0
	II	415~616	0.993	-286.1	16.9	745~931	0.893	-603.3	10.0	704~953	0.930	-444.0	10.8
	III	616~1153	0.025	275.1	32.7	931~2759	0.002	198.4	20.6	953~2878	0.003	497.7	52.6
	IV	1153~3249	0.984	-905.0	25.6	2759~4047	1.000	-2539.6	0.3	2878~4458	1.000	-2353.1	0.0
10	I	0~415	0	85.5	0	0~742	0	59.9	0	0~676	0	207.4	0
	II	415~616	0.993	-286.1	16.9	742~859	0.990	-679.5	1.2	676~961	0.966	-472.3	7.3
	III	616~1153	0.829	553.1	36.9	859~2778	0.007	186.7	17.6	961~2880	0.007	484.7	49.1
	IV	1153~3249	0.984	-905.0	25.6	2778~3280	1.000	-2539.6	0.0	2880~3757	1.000	-2352.0	0.0
11	I	0~417	0	85.5	0	0~739	0	59.9	0	0~695	0	207.4	0
	II	417~602	1.000	-332.5	0.2	739~878	0.973	-664.7	2.8	695~1007	0.900	422.9	9.2
	III	602~1153	0.003	256.9	17.6	878~2631	0.005	198.8	17.1	1007~2880	0.001	499.3	48.7
	IV	1153~3249	0.984	-905.0	25.6	2631~3454	0.857	2044.4	0	2880~3757	1.000	-2352.0	0.0
12	I	0~631	0.016	79.7	4.5	0~744	0	59.9	0	0~698	0	207.4	0
	II	631~766	1.059	-569.5	39.0	744~871	1.000	-687.4	0.1	698~995	0.989	-490.9	3.3
	III	766~1153	0.080	182.1	24.7	871~2631	0.003	192.0	13.4	995~2880	0.001	497.8	49.1
	IV	1153~3249	0.94	-905.0	25.6	2631~3454	0.857	2044.4	0	2880~3757	1.000	-2352.0	0

표 2. 저수지 운영모형 검증 결과

저수지	조작검증(GWH, a)	운영실적(GWH, b)	비교(a/b)
화천댐	331.1	266.3	1.24
소양강댐	712.3	474.1	1.50
춘천댐	172.3	160.9	1.07
의암댐	207.7	163.0	1.27
청평댐	320.9	291.2	1.10
충주댐	343.7	701.1	0.49
팔당댐	241.3	342.6	0.70
합계	2329.8	2399.2	0.97

턴 및 회귀 분석을 통하여 작성하였다. 화천댐, 소양강댐, 충주댐은 그 저류 능력이 크기 때문에 제어 능력이 상대적으로 크므로 조작 패턴이 잘 형성이 되는 반면에 저수지의 저수용량이 작은 춘천댐, 의암댐, 청평댐, 팔당댐의 경우는 분산이 다소 크게 나타났다. 이때 조작기준은 유입량의 계절적 특성을 감안하여 월 계절별로 작성하였다. 작성된 조작기준으로 만든 저수지 운영모형으로 1986년부터 1994년까지 모의한 결과, 2001년도 수요를 충족시키면서 발전은 당기간 운영 실적치에 접근함을 알 수 있었다. 따라서 본 연구에서 작성된 한강수계 저수지 계통의 조작기준은 수계내 이수 계획에 기초 자료가 될 수 있을 뿐만 아니라 댐 운영 및 관리에 월말 평가 정보로 이용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

고석구, 이광만, 이한구 (1997). "양해 추계학적 동적계획기법에 의한 저수지 운영률 개발." 한국수자원학회논문집, 제30권, 제3호, pp. 269~278.
 권오헌, 박용근 (1986). "용수공급 최대화를 위한 Rule Curve 개발사례." 충남대학교산업기술연구소 논문집, 제12권, 제2호.
 권오헌, 선우중호 (1985). "이산형 선형추적에 의한 제약 저수지계의 최적제어." 대한토목학회지 제5권, 제3호, pp. 1~12.
 유주환 (1998). LINEAR TRACKING에 의한 한강수계 댐군의 최적 수력발전 운영. 박사학위논문, 충남대학교.
 유주환, 김재환, 정관수 (1999). "한강수계 복합 저수지 시스템의 최적 수력발전 운영을 위한 LINEAR TRACKING의 적용." 한국수자원학

회논문집, 제32권, 제5호, pp. 579~591.
 이희승, 심순보, 고석구 (1992). "신뢰도를 고려한 다차원적 저수지의 월별 운영률." 한국수문학회지, 제25권, 제1호, pp. 75~82.
 한국수자원공사 (1990). 수자원장기종합계획 보고서.
 한국수자원공사 (1992). 주암댐을 중심으로한 섬진강수계내 저수지군의 연계최적운영(이수관리 부문) 연구보고서.
 한국수자원공사/수자원연구소 (1992). 한강수계 충주저수지 시스템의 실시간 최적운영을 위한 의사결정 지원 시스템 개발(이수관리부문) 연구보고서.
 한국전력공사 (1995). 수력발전소 운용 자료집(1971~1994).
 Askew, A.J. (1974). "Optimum reservoir operating policies and the imposition of a reliability constraint." *Water Resources Research*, Vol. 10, No. 1, pp. 51~56.
 Bhaska, N.R., and Whitlatch, Jr., E.E. (1980). "Derivation of monthly reservoir release policies." *Water Resources Research*, Vol. 16, No. 6, pp. 987~993.
 Chung, F.I., Arora, S.K., and Archer, M.C. (1988). "Stochastic evaluation of reservoir operation rules." *Proceedings of the 3rd Water Resources Operations Management Workshop*.
 Crawley, P.D., and Dandy, G.C. (1993). "Optimal operation of multi-reservoir system." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 119, No. 1,

- pp. 1~17.
- Evenson, D.E., and Monseley, J.C. (1970). "Simulation/optimization techniques for multibasin water resources planning." *Water Resources Bulletin*, Vol. 6, No. 5, pp. 725~736.
- Georgakakos, A.P. (1989). "Extended linear quadratic gaussian control : further extensions." *Water Resources Research*, Vol. 25, No. 2, pp. 191~201.
- Hue W (1987) "A study on the reservoir operation rule curve derivation by mathematical programming." *ICID Bulletin*, Vol. 36, No. 1, pp. 51~57.
- Jettmar, R.U., and Young, G.K. (1975). "Hydrologic estimation and economic regret." *Water Resources Research*, Vol. 11, No. 5, pp. 648~656.
- Karamouz, M., and Houck, M.H. (1987). "Comparison of stochastic and deterministic dynamic programming for reservoir operation rule generation." *Water Resources Bulletin*, Vol. 23, No. 1, pp. 1~9.
- Karamouz, M. and Vasiliadis, H.V. (1992). "Bayesian stochastic optimization of reservoir operation using uncertain forecasts." *Water Resources Research*, Vol. 28, No. 5, pp. 1221~1232.
- Kelman, J., Stedinger, J.R., Cooper, L.A., Hsu, E., and Yuan, S. (1990). "Sampling stochastic dynamic programming applied to reservoir operation." *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 3, pp. 447~454.
- Ko, S. (1989). *Optimizing reservoir system operation with multiobjective decision analysis*. Ph. D. dissertation, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
- Linsley, R., and Franzini, J. (1979). *Water Resources Engineering*. 3rd ed., MGH.
- Loucks, D.P., Stedinger, J.R., and Haith, D.A. (1981). *Water Resource Systems Planning and Analysis*. Prentice-Hall, Inc., New Jersey.
- Lund, J.R and Ferreira, I. (1996). "Operating rule optimization for missouri river reservoir system." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 122, No. 4, pp. 287~295.
- Maass, A., Hufschmidt, M., Dorfman, R., Thoman, H., Marglin, Jr., Press, S., and Fair, G.M. (1962). *Design of Water-Resource Systems*. Harvard Univ. Press, Cambridge.
- Martin, Q.W. (1995). "Optimal reservoir control for hydropower on Colorado river, Texas." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 121, No. 6, pp. 438~446.
- McLaughlin, D. and Velasco, H. L. (1990). "Real-time control of a system of large hydropower reservoirs." *Water Resources Research*, Vol. 26, No. 4, pp. 623~635.
- Mizyed, N.R., Loftis, J.C., and Fontane, D.G. (1992). "Operation of large multireservoir systems using optimal control theory." *Journal of Water Resources Planning and Management*, Vol. 118, No. 4, pp. 371~387.
- Oliveira, R., and Loucks, D.P. (1997). "Operating rules for multireservoir systems." *Water Resources Research*, Vol. 33, No. 4, pp. 839~852.
- Tejada-Guibert, J.A, Johnson, S.A, and Stedinger, J. R. (1993). "Comparison of two approaches for implementing multireservoir operating policies derived using stochastic dynamic programming." *Water Resources Research*, Vol. 29, No. 12, pp. 3969~3980.
- Yang, X., et al. (1995). "Comparison of real-time reservoir operation techniques." *Journal of Water Planning and Management*, Vol. 121, No. 5, pp. 345~351.
- Young, G.K. (1967). "Finding reservoir operation rules." *Journal of the Hydraulic Division, ASCE*, 93(HY6), pp. 297~319.

(논문번호:99-092/접수:1999.11.29/심사완료:2000.11.06)