

위험도 평가기준을 적용한 저수지 최적운영방안 연구(I) (대청댐을 중심으로)

A Study of Optimal Operation Policy using Risk Evaluation Criteria(I) (for the Daechung Multi-purpose Reservoir)

박 명 기* / 김 재 한** / 정 관 수***

Park, Myung Ky / Kim, Jae Han / Jung, Kwan Sue

Abstract

The application of conventional method for optimizing firm water supply and hydro-electric power generation has some limitation during abnormal or extreme drought periods. Hashimoto et al. (1982) suggested three risk evaluation criteria such as reliability, resilience, and vulnerability. These three criteria have been incorporated into a mixed-integer programming model for evaluating the possible performance of water supply reservoir (Moy et al., 1986; Srinivasan et al., 1999). However, till now, these kind of researches have been conducted only for water supply reservoir. Therefore there have been no other study for multi-purpose dam including hydro-electric power generation.

This study presents an improved formulation of the previous model for evaluating a multi-purpose reservoir system operation considering water supply and hydro electric power generation. The modified model was applied to the Daechung multi-purpose reservoir system in the Keum river basin to demonstrate the efficiency of the improved formulation.

keywords : risk evaluation criteria for reservoir operation, reliability, resilience, vulnerability, mixed-integer programming, optimal reservoir operation, Daechung Multi-purpose Reservoir

요 지

이수목적 수량관리를 위한 보장수량과 수력발전 등을 고려한 최적화 기법은 이상가뭄 또는 특이 수문년을 포함

-
- * 충남대학교 대학원 토목공학과 박사과정수료, 한국수자원공사 물관리종합상황실
Ph.D. Candidate, Dept. of Civil Eng., Chungnam National Univ., Taejeon 305 764, Korea
(E-mail : mkpark11@hananet.net)
 - ** 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수, 공학박사
Professor, Dept. of Civil Eng., Chungnam National Univ., Taejeon 305 764, Korea
(E-mail : jhkim@hydro.cnu.ac.kr)
 - *** 충남대학교 공과대학 토목공학과 조교수, 공학박사
Assistant Prof., Dept. of Civil Eng., Chungnam National Univ., Taejeon 305 764, Korea
(E-mail : ksjung@hanbat.cnu.ac.kr)

하는 경우에는 적용에 한계가 있다. 이러한 관점에서 Hashimoto 등(1982)에 의해 제안된 물부족에 관련된 3가지 평가기준을 혼합정수계획법을 통해 최적화모형에 반영하기 위한 시도가 Moy 등(1986)과 Srinivasan 등(1999)에 의해 제시된 바 있다. 그러나 이들 연구는 용수공급용 단일 저수지에 대해 한정되어 발전을 포함하는 다목적댐에 적용할 수 있는 정식화 연구는 부진한 실정이다.

본 연구에서는 다목적댐의 용수공급 및 수력발전 최적화 문제에 위험도 평가기준을 도입하여 운영평가를 위한 정식화 형태를 개선하였으며, 개선된 모형을 금강수계 대청다목적댐에 적용하여 그 실효성을 평가하였다.

핵심용어 : 위험도 평가기준, 신뢰도, 복원도, 부족심도, 혼합정수계획법, 저수지 최적운영, 대청다목적댐

1. 서론

저수지들은 목표 수요량에 만족하도록 설계되어지고 운영되어진다. 저수지 물공급에 대한 평가는 일반적으로 용수공급의 부족상황을 나타낼 수 있는 몇몇 평가지수들로서 가능해지는데, 이들은 빈도(frequency), 지속기간(duration), 심각도(severity of failure)이다. 다른 말로 표현하면 저수지의 물공급에 대한 신뢰도(reliability), 복원도(resilience), 부족심도(vulnerability)로서 이들 모두 저수지의 운영이나 설계상의 위험도(risk)를 표현한다. Hashimoto 등(1982)은 논문에서 “불만족스런 수행기간의 심각성을 명확히 이해하는 것은 보다 좋은 의사결정을 제공하는데 도움이 된다”고 하였다. 비록 신뢰도가 일반적으로 사용되는 저수지 계획 및 운영에서의 평가기준이라고 하더라도, 이는 단지 물부족의 빈도일 뿐이며 지속된 물부족의 평가나 그 결과에 대한 평가는 아니라는 점에 유의해야 한다. 복원도는 저수지시스템에 있어서 물부족으로부터 회복하고 정해진 기간내에 평상의 운영으로 회복되는 능력으로 정의된다. 합리적인 수준의 신뢰도를 보장할 수 있을 때는 그 신뢰도를 보다 향상시키는 것 보다는 물부족심도를 감소시키는 것이 보다 바람직할 것이다.

이러한 위험도 평가기준의 정식화를 위한 연구는 Moy 등(1986)과 Srinivasan 등(1999)에 의하여 혼합정수계획기법으로 정식화할 수 있는 방안이 마련되었으나 이들 선행연구들은 용수공급전용의 단일댐에 대한 운영을 대상으로 연구되었으며, 평가기준에 타목적과의 trade-off 분석 등을 포함한 보다 확장된 연구는 부진하다. 본 논문은 기존 연구로부터 수력발전을 포함한 형태로 확장하였으며, 이를 금강수계 대청 다목적댐에 적용하여 정식화내용을 개선하였다.

2. 수행성 평가 기준

2.1 신뢰도(reliability)

Hashimoto 등(1982)은 신뢰도(reliability)란 “그 시스템의 상태가 만족스러운 경우의 빈도 또는 확률(α)”라고 정의하고 식(1)과 같이 표현하였다.

$$\alpha = Prob [X_t \in S] \quad (1)$$

여기서, X_t : 물공급 시나리오를 대상으로한 무작위 변수

S : 만족스러운 결과집합(satisfactory set)

그러나 신뢰도의 이러한 정의만으로는 물부족에 대한 심각도를 만족스럽게 표현할 수 없으며, 추가로 복원도와 부족심도의 평가기준이 필요하다.

2.2 복원도(resilience)

복원도(resilience)란 어떤 시스템에 한번 물부족이 발생한 후에 다시 정상상태로 얼마나 빨리 회복되어지는가를 나타내는 기준으로서 Hashimoto 등(1982)은 식(2)와 같이 정의하였다.

$$\gamma = \frac{\rho}{1 - \alpha} = \frac{Prob \{X_t \in F, X_{t+1} \in S\}}{Prob\{X_t \in F\}} = Prob\{X_{t-1} \in S \mid X_t \in F\} \quad (2)$$

여기서, γ : 복원도

α : 신뢰도

ρ : $Prob \{X_t \in S, X_{t+1} \in F\}$

F : 물부족이 발생한 결과 집합(failure set)

2.3 부족심도(vulnerability)

시스템의 부족심도(vulnerability)란 물부족의 심각성 정도를 나타내는 기준이다. 시스템의 효율성과 신뢰

도를 최대화하기 위해서는 시스템의 부족심도가 증가되는데, Hashimoto 등(1982)은 부족심도의 수학적 표현을 위하여 수행성 평가 변수인 X_t 를 x_1, \dots, x_n 으로 이산화할 수 있다고 할 때, x_j 의 불부족에 대한 심각도를 표현하는 s_j 라는 변수를 도입하고 각 s_j 에 대한 각 발생확률을 e_j 라고 하면, 시스템의 부족심도는 수학적으로 식(3)과 같이 표현될 수 있다고 하였다.

$$\nu = \sum_{j=1}^n s_j \cdot e_j \quad (3)$$

3. 혼합정수계획법에 의한 평가기준 정식화

3.1 기존 수학적모형

신뢰도는 수자원계획에 있어서 폭넓게 사용되고 있는 개념으로서 최초의 신뢰도에 대한 개념 도입은 Revelle 등(1969)에 의해서였다. 그후 이 신뢰도에 대한 개념을 유사 분야에 적용하기 위한 다양한 수정과 개선이 있어왔다. Fiering(1982)은 몇몇 복원도에 대한 정의를 제시하고 그들의 장단점에 대하여 서술한 바 있다. Loucks 등(1981)은 다양한 저수지 평가기준들에 대한 적용성을 제시한 바 있다. 이후에도 몇몇 불공급 저수지의 운영·관리에 대한 연구가 3가지의 평가기준인 신뢰도, 복원도, 부족심도를 기준으로 Hashimoto 등(1982), Moy 등(1986), Bayazit 등(1990), Srinivasan 등(1998), Srinivasan 등(1999)에 의하여 제시된 바 있다. Moy 등(1986)의 논문은 혼합정수계획법을 이용하여 평가기준을 명확하게 최적화 모형내에 연개하였지만 저수지의 복원도 특성을 부분적으로만 고려할 수 있었다. 그 이유는 당시의 제약조건이 저수지 시스템의 평균적인 회복율을 정량화하지 못하였다는 데에 있었다. Srinivasan 등(1999)은 이러한 Moy 등(1986)의 논문이 가지는 결점을 보완하기 위하여 불부족 상황으로부터 정상상황까지의 회복단계들을 추적하는 또 다른 정수형 변수의 도입방법을 시도하였다. 반면에 나머지 연구들은 저수지 운영평가지수를 시뮬레이션 모형에 의하여 산정한 바 있다.

저수지운영과 관리부분의 선형계획문제 정식화에서 일반적인 어려움은 저류량, 연속방정식 제약조건이 수분방류량을 명확하게 통제하지 않음이라는 점이었다. 이는 저수지에서 수분방류량이 발생하는 경우에도 저수지는 만수(full)되지 않음이라는 것으로서 Moy 등(1986)의 정식화는 이와 같은 문제를 가지고 있었다. 비록 수분방류량 항을 연속방정식에 가지고 있다고 하더라도

저수지 용량 및 저수량에 관련하여 제어하는 제약조건이 존재하지 않았었다. 최근에 Shih 등(1994, 1995)은 수분방류량을 인식하고 제어할 수 있는 0, 1의 정수형 변수를 사용한 시도로 이와 같은 문제를 해소하는 정식화 방안을 제공하였으며, Srinivasan 등(1999)은 평가기준 정식화에 Shih 등(1994, 1995)의 기법을 적용하였다.

3.2 용수공급 목적 저수지운영을 위한 평가기준 정식화

Moy 등(1986)에 의하여 최초로 제시된 용수공급 전용댐의 신뢰도, 복원도, 부족심도에 대한 평가기준 정식화는 다음과 같다.

$$\text{Minimize } \bar{Z} = 0.01 \sum_{t=1}^n M_t + D_{\max} \quad (4)$$

subject to

$$S_t = S_{t-1} + I_t - X_t - W_t \quad \forall t \quad (5)$$

$$S_t - C \leq 0 \quad \forall t \quad (6)$$

$$X_t + M_t \leq D_t \quad \forall t \quad (7)$$

$$M_t - Y_t \cdot D_t \leq 0 \quad \forall t \quad (8)$$

$$M_t - D_{\max} \leq 0 \quad \forall t \quad (9)$$

$$\sum_{t=K}^{K+N} Y_t \leq N \quad K=1, 2, \dots, (n-N) \quad \forall t \quad (10)$$

$$S_n - S_0 \geq 0 \quad (11)$$

$$\sum_{t=1}^n Y_t = p \quad (12)$$

- 여기서, S_t : 기간 t 종점에서의 유효 저수량
 X_t : 기간 t 동안의 저수지 방류량(수문방류량 제외)
 W_t : 기간 t 동안의 저수지 수분방류량
 M_t : 기간 t 동안의 불부족
 D_{\max} : max.(M_t)
 A_t : 연속된 불부족 기간 수
 E_t : 정수형 처리를 위한 보조 변수
 A_{\max} : max.(A_t)
 Y_t : 기간 t 동안 불부족이 생기면 1, 아니면 0
 n : 분석이 수행된 총 기간수
 I_t : 기간 t 동안 저수지 유입량
 D_t : 기간 t 동안 목표 수요량
 C : 저수지 용량(유효저수용량 개념)

단, 모든 위 변수들은 0이상

그러나 식(4)~식(12)의 정식화에서는 2가지의 문제 점을 가지고 있었다. 그 첫째는 물공급 부족발생에 따른 복원특성이 추적되지 않아 당초 Hashimoto 등(1982)에 의해 제시된 복원도에 대한 개념이 정확히 고려되지 않았다는 점이고, 둘째는 저수지 수위가 만수조건이 아닌 상황에서 수문방류가 발생한다는 점이였다. Srinivasan 등(1999)은 이러한 두 가지 문제를 해결하기 위하여 별도의 제약조건을 식(13)~식(16)과 같이 추가하여 단일담 개념의 물공급에 대한 평가기준을 정식화 할 수 있었다. 저수지 시스템의 복원도는 물부족 발생으로부터 회복하려는 시스템의 능력에 대한 척도이다. 당초 Hashimoto 등(1982)에 의해 제시된 복원도의 개념인 평균 회복율(average recovery rate)을 위 Moy 등(1986)의 정식화 제약식에 도입하기 위해서는 다음과 같은 식(13), (14)가 필요하게 된다.

$$Y_t + Y_{t+1} + k_t - 2 R_t = 0 \quad \forall t \quad (13)$$

$$0.5 \sum_{i=1}^n k_i - \gamma \sum_{i=1}^n Y_i \geq 0 \quad \forall t \quad (14)$$

여기서, k_t, R_t : 0, 1 정수형 변수들

또한 선형계획문제에서 저수지운영에 대한 문제를 해석하는 경우 발생하는 만수조건이 아닌 경우에 발생하는 여수로 수문방류량을 제약하기 위하여 Shih 등(1994)의 방식대로 식(15), (16)을 추가할 필요가 있다.

$$b_t \leq S_t / C \quad \forall t \quad (15)$$

$$W_t - b_t \cdot B \leq 0 \quad \forall t \quad (16)$$

여기서, b_t : 0, 1 정수형 변수

B : 수문방류량 보다 충분히 큰 수

3.3 수력발전함수 정식화

수력발전함수는 발전함수가 가지는 비선형성으로 인하여 선형계획문제에 대한 연구는 부진한 편이다. 그 중 대표적인 연구사례로는 Grygier 등(1985)과 Martin 등(1983, 1987)에 의한 축차선형계획법(Sequential Linear Programming)의 적용성 검토이며, 국내에서도 이규탁 등(1995)이 금강수계 대청다목적댐에 대하여 적용한 바 있다. 혼합정수계획법에 의한 수력발전량 최적화에 대한 연구는 Trezos(1991)가 미국 Big Creek System에 대한 월단위 방류량 의사결정에 적

용한 것이 대표적인 경우라 할 수 있다. 그러나 혼합정수계획기법은 이용수심구간이 많은 저수지에 대한 발전함수 선형화과정에서 많은 정수형 변수를 필요로 하여, 정수형 변수결정 과정의 연산시간 장기화의 한계를 가진다. 따라서 본 연구에서는 축차선형계획법에 의하여 수력발전 최대화의 목적함수를 구성하고, 이를 3.2절에서 유도된 용수공급목적 정식화에 항을 추가할 수 있도록 구성하였다.

수력에너지는 식 (17)과 같이 표현된다.

$$EGY_t = 9.8 \cdot \eta \cdot X_t \cdot H_t / 3.6 \quad (17)$$

여기서, EGY_t : t 기간 중 생산되는 수력에너지(MWh)

η : 수차와 발전기의 합성 효율

X_t : 발전 사용수량($10^6 m^3$)

H_t : 발전기 유효낙차(m)

위 식(17)은 2개의 의사결정 변수의 곱으로 표현된 비선형 방정식이다. 식(17)의 발전기 유효낙차(H_t)는 이용수심구간에서 식(18)과 같이 표현될 수 있다.

$$H_t = a \cdot \overline{S}_t^b - TWL - HL \quad (18)$$

여기서, a, b : 저수량으로부터 댐수위 산정을 위한 회귀상수

\overline{S}_t : t 기간중 평균저수량($10^6 m^3$)

TWL : 평균방수위(EL. m)

HL : 손실수두(m)

위 발전함수는 $f(X_t, \overline{S}_t)$ 와 모든 편도함수가 $X_t = X_t^0, \overline{S}_t = \overline{S}_t^0$ 부근에서 연속인 조건에서 초기치 $[X_t^0, \overline{S}_t^0]$ 에 대해 Taylor 급수전개 후 2차항 이상을 소거하면 식(19)와 같이 선형화시킬 수 있다.

$$EGY_t \approx F_t \cdot \overline{S}_t + G_t \cdot X_t + H_t \quad (19)$$

여기서, $F_t : 9.8\eta/3.6 \cdot a \cdot X_t^0 \cdot b \cdot \overline{S}_t^{0b-1}$

$G_t : 9.8\eta/3.6 \cdot a \cdot (\overline{S}_t^{0b} - TWL - HL)$

$H_t : -9.8\eta/3.6 \cdot a \cdot X_t^0 \cdot b \cdot \overline{S}_t^0$

3.4 월별 용수수요 변동비율의 고려

Trott 등(1971)은 동적계획법에 의한 댐군 월별 최적운영검토에 있어 월별 공급량을 연간 공급능력 개

념으로 식(20)과 같이 환산 적용한 바 있다.

$$\max \left\{ \min \frac{O_t}{C_j} \right\} \quad (20)$$

여기서, O_t : t번째 월의 댐 방류량

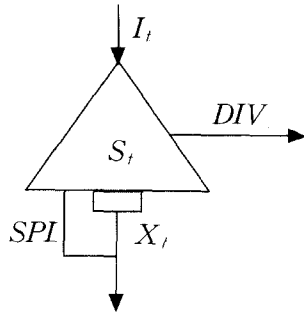
C_j : 연간 목표 공급량 대비 j월 댐 공급 목표치의 비

본 연구에서는 식(9)의 D_{max} 산정에 식(20)을 적용하여 각 월별 목표 방류량에 대한 가중치를 부여할 수 있도록 정식화에 반영하였다.[식(28),(29) 참조]

4. 금강수계 대형 다목적댐 적용을 위한 모형 구축

4.1 저수지 시스템 정의

현재 금강수계에는 대형댐을 비롯하여 2000년말부터 댐축조가 마무리중인 용담댐이 있으나 본 논문에서는 용담댐을 배제하고 대형댐 단일댐만으로 준공 후 최대 감수기간인 1993년~1995년에 대해서 모형화를 시도하였다.



여기서, I_t : 저수지 유입량

S_t : 저수지 저수량

X_t : 저수지 발전 사용수량

SPL_t : 저수지 수문 방류량

DIV_t : 대전·청주지역 도수량

그림 1. 저수지 시스템 정의(대형댐)

4.2 다목적댐 적용을 위한 평가기준 정식화

기존 연구에서는 신뢰도, 복원도, 부족심도에 대한 검토를 용수공급목적의 단일댐을 대상으로 제시하였다. 그러나 다목적댐의 이수목적 수량제어를 위해서 본 연구에서는 수력발전과 식(20)에서의 월별 용수수요 변동

비율을 고려하는 정식화를 추가하였다.

앞서 3.2, 3.3절에서 정리된 내용을 금강수계 대형 다목적댐에 적용하기 위한 정식화 결과는 식(21)~(40)에 정리하였다.

$$\begin{aligned} \text{MAXIMIZE } \bar{Z} = & -0.01 \sum_{t=1}^n M_t - 1.0 \text{ DMAX} \\ & + \text{coef}_{ENV} \sum_{t=1}^n \text{Energy}_t \quad (21) \end{aligned}$$

subject to

$$S_t = S_{t-1} + I_t - X_t - \text{DIV}_t \quad \forall t \quad (22)$$

$$S_n - S_0 \geq 0 \quad \forall t \quad (23)$$

$$\text{SMIN}_t \leq S_t \leq \text{SMAX}_t \quad \forall t \quad (24)$$

$$b_t \leq S_t / \text{SMAX}_t \quad \forall t \quad (25)$$

$$W_t - b_t \cdot B \leq 0 \quad \forall t \quad (26)$$

$$X_t + M_t \geq D_t \quad \forall t \quad (27)$$

$$MC_t - \text{DMAX} \leq 0 \quad \forall t \quad (28)$$

$$M_t - C_j \cdot MC_t = 0 \quad \forall t \quad (29)$$

$$M_t - Y_t \cdot D_t \leq 0 \quad \forall t \quad (30)$$

$$\sum_{t=K}^{K+N} Y_t \leq N \quad K=1, 2, \dots, (n-N) \quad \forall t \quad (31)$$

$$\sum_{t=1}^n Y_t = p \quad (32)$$

$$Y_t + Y_{t+1} + k_t - 2 R_t = 0 \quad \forall t \quad (33)$$

$$0.5 \sum_{t=1}^n k_t - \gamma \sum_{t=1}^n Y_t \geq 0 \quad \forall t \quad (34)$$

$$X_t - \text{TMAX}_t \leq 0 \quad \forall t \quad (35)$$

월별 발전함수의 선형화결과인 식(19)의 적용을 위한 축차선형계획법의 적용을 위하여 제약조건에 식(36) 및 식(37)을 추가하여 식(38)의 선형화된 발전함수를 목적함수에 반영하였다.

$$\begin{aligned} -\text{STEP_SIZE}_{STO} & \leq \frac{(S_t - S_t^0)}{S_t^0} \\ & \leq +\text{STEP_SIZE}_{STO} \quad \forall t \quad (36) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -\text{STEP_SIZE}_{TUR} & \leq \frac{(X_t - X_t^0)}{X_t^0} \\ & \leq +\text{STEP_SIZE}_{TUR} \quad \forall t \quad (37) \end{aligned}$$

$$\text{Energy}_t - F_t \cdot \bar{S}_t - G_t \cdot X_t - H_t = 0 \quad \forall t \quad (38)$$

위 정식화 결과에 상류 취수량 및 하류 방류량간의 우선순위를 부여하기 위하여 상류 취수량이 100% 충

족된 상태에서 하류 사용수량이 발생하도록 유도하였다. 식(39) 및 (40)은 이러한 목적으로 상류 취수량이 목표치에 도달되는 경우에 정수형 변수 e_t 가 1이 되고, 이때 하류측 사용수량이 발생할 수 있도록 추가하였다.

$$e_t \leq DIV_t / DIV_{MAX} \quad \forall t \quad (39)$$

$$X_t - e_t \cdot B \leq 0 \quad \forall t \quad (40)$$

- 여기서, S_t : 기간 초기 저수량
 I_t : 기간별 유입량
 X_t : 기간별 발전사용수량
 W_t : 기간별 수문방류량
 DIV_t : 댐 상류 도수량
 $SMIN$: 최소 저수량 제약(LWL 상당 저수량)
 $SMAX_t$: 최대 저수량 제약(NHWL 및 홍수기 제한수위 상당 저수량)
 M_t : 물부족량
 MC_t : 연간 개념으로 환산된 물부족량
 D_t : 저수지의 기간별 목표 용수공급량
 Y_t : 물부족 발생을 알리는 0, 1 정수형 변수
 $DMAX$: 최대 물부족 발생량
 N : 연속 최대 물부족 발생기간
 p : 물공급 발생에 관한 상한치
 k_t : 복원도 산정을 위한 crossover 발생 횟수
 R_t : 복원도 산정을 위한 임시변수
 γ : 복원도 상한치
 b_t : 수문방류 발생을 알리는 0, 1 정수형 변수
 e_t : 상류 취수량 부족을 알리는 0, 1 정수형 변수
 B : 발생가능한 수문방류량을 표현할 수 있는 충분히 큰 값
 $TMAX_t$: 최대 발전사용수량
 $Energy_t$: 댐별 발전량
 $coef_{EGY}$: 수력발전량에 대한 목적함수 가중치

5. 모형 수행결과 및 분석

5.1 개발모형의 수행

축차선형계획기법은 많은 수의 연산과정을 필요로

한다. 본 모형의 기본 흐름은 그림 2와 같다. 수력발전 함수의 비선형성을 해결하기 위한 축차선형계획기법의 적용을 위하여 최초에는 발전량을 제외한 용수공급목적만으로 최적 방류량 계열 및 저수량 계열을 산정하고 2번째 반복연산부터는 이전단계에서의 정보를 읽어들이 상태에서 발전량을 포함한 최적 방류량 및 저수량 계열이 산정되도록 구성하였으며 수렴조건은 목적함수의 기울기가 0.002미만인 경우로 하였다. 혼합정수계획기법의 해석엔진은 Branch and Bound 알고리즘에 기초해 개발된 미 ILOG사의 CPLEX 7.0(2000)을 Windows98 운영체제에서 적용하였다.

5.2 시험운영 결과

5.2.1 분석조건

본 검토를 수행하기에 앞서 목적함수의 각 항목별 가중치를 결정하기 위하여 우선 그림 3과 같은 축차선형계획모형의 목적함수 수렴정도 및 반복연산 횟수를 검토하였다. 사용수량부분의 변동폭을 10~50%의 범위내에서 변동시키고 저수량부분의 변동폭을 10~50% 범위에서 변동시켜 목적함수의 수렴성과 계산시간을 비교하여 사용수량부분의 변동폭 제약을 기존 X^0 에 대해 20%, 저수량부분의 변동폭 제약을 S^0 의 20%를 기준으로 채택하였다.

모형의 시산과정에서 저수지운영의 수행결과가 실제 운영상황과 부합되어질 수 있도록 용수부분에 대한 가중치를 상대적으로 만족시키게 적용하여 물부족에 대한 PENALTY를 우선적으로 적용하여, 총 물부족량 계수를 0.01로 하고, 최대 물부족량 계수를 1.00으로 적용하였다. 이에 대비하여 물부족의 위험도 평가기준과 연간 발전량과의 trade-off 분석을 위하여 연간발전량에 대한 가중치를 변동시키며 목적함수의 변동특성을 비교하였다. trade-off 분석을 위한 혼합정수계획기법에서의 noninferior set에 대한 해찾기 과정은 그림 4와 같다. 발전량에 대한 trade-off를 함께 고려하는 과정에서 분석시간의 과다로 본 논문에서는 식(33) 및 (34)에서의 평균 복원도(γ)에 대한 제약을 무시하고 수행하였다. 이는 trade-off 분석과정에서의 복원도는 물부족의 지속기간(N)에 의해 충분히 반영되어지기 때문이나 실제 운영모형의 개발에 있어서는 평균 복원도(γ)에 의한 영향을 반영하여야 한다.

5.2.2 모형 수행결과

모형 수행은 저수지 운영에 따른 용수공급능력 확보

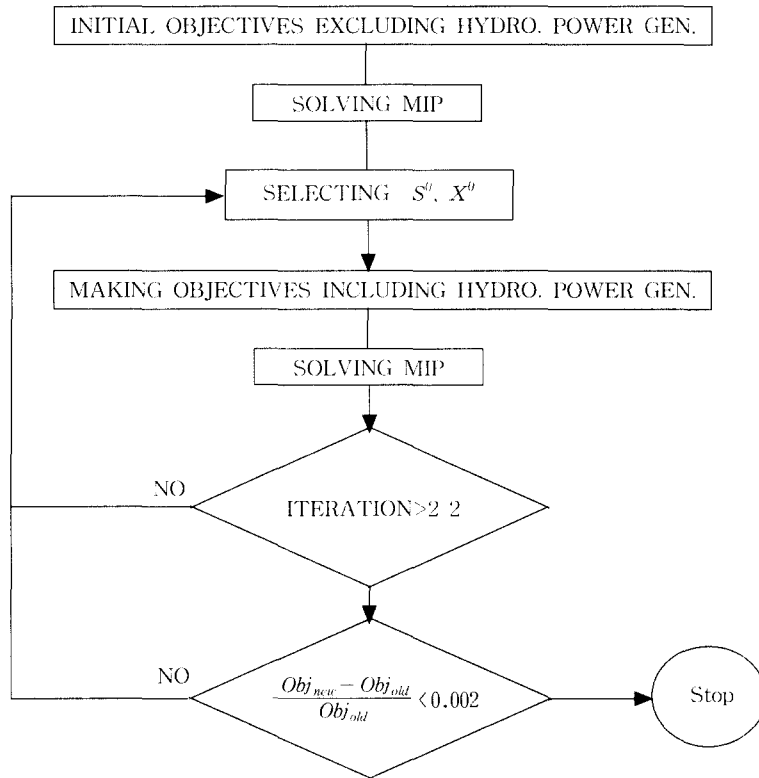


그림 2. MIP-SLP 모형의 수행과정

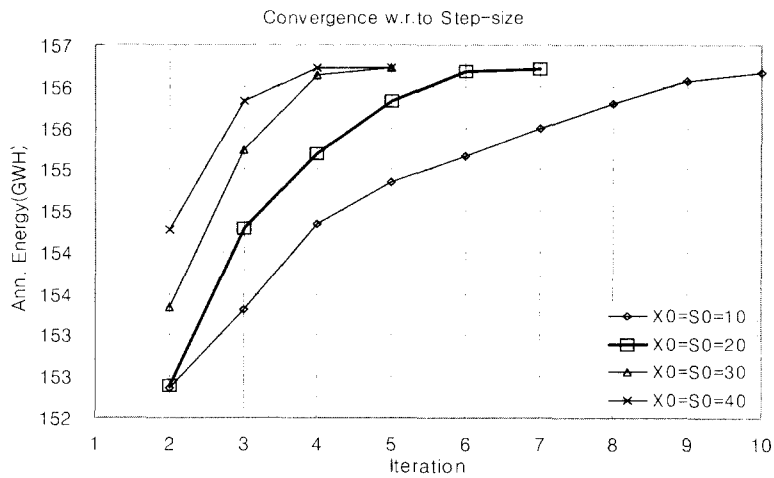


그림 3. 축차선형계획법 수행을 위한 step-size(%) 적용결과

를 고려하여 12개월 이상의 물부족발생은 현실적으로 검토의 의미가 없다고 판단하였다. 따라서 분석기간인 3년(36개월)중 최소한 24개월 이상은 물부족이 발생되

지 않는 것으로 고려하여, 최초 최대 물부족 발생 횟수에 대한 제약을 13회로 고정하고 수행하였다. 분석결과 13회의 물부족에 대해 제약된 N치는 6이하의 범위에

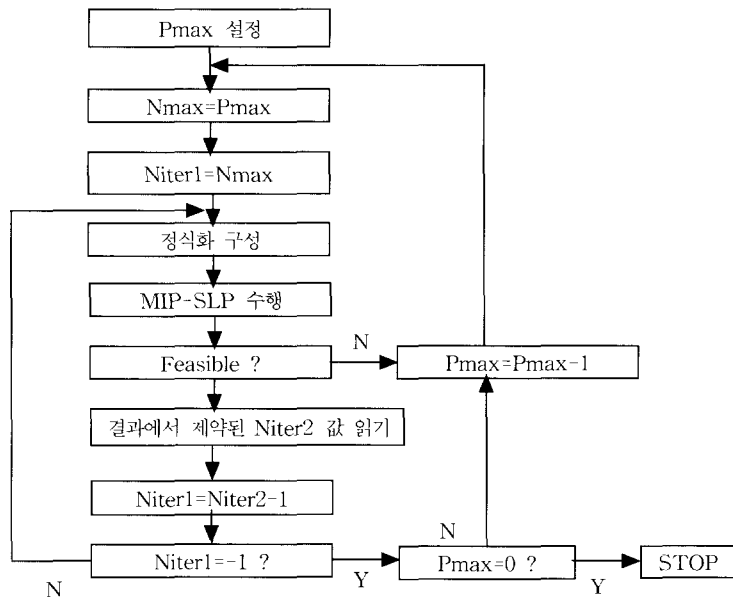


그림 4. trade-off 분석과정

표 1. 모형수행결과

발전함수 가중치	목적함수	연간 발전량 (GWH)	입 력 조 건		출력된 해당 평가지수			
			P	N	P	N	DMAX1	DMAX2
0.00	-28.2	-						
0.01	-26.7	155.7	13	13	13	6	39.6	106.0
0.10	-12.6	156.1						
0.50	49.8	156.1						
0.00	-35.7	-						
0.01	-34.2	155.8	9	3	9	3	54.2	145.3
0.10	-20.1	156.2						
0.50	42.4	156.2						
0.00	-2951.3	-						
0.01	-2949.6	167.3	5	1	5	1	88.8	237.8
0.10	-2934.7	165.9						
0.50	-2868.3	165.9						
0.50	47.6	156.1	11	11	11	6	43.9	117.6
	47.6	156.1	11	5	11	5	44.0	117.7
	47.4	156.1	11	4	11	4	44.4	118.8
	46.2	156.2	11	3	11	3	46.8	125.5
	45.5	156.1	11	2	11	2	48.0	128.6
	41.7	156.1	11	1	11	1	55.5	148.6
	46.1	156.1	10	10	10	6	46.8	125.3
	46.1	156.1	10	5	10	5	46.8	125.3
	45.9	156.1	10	4	10	4	47.3	126.7
	44.4	156.2	10	3	10	3	50.2	134.4
43.7	156.2	10	2	10	2	51.5	138.1	
-103.5	159.7	10	1	10	1	59.6	159.7	

단, DMAX1 : 월별 물부족량의 최대치(MCM/월) DMAX2 : 연간 개념으로 환산된 물부족량의 최대치(MCM/년)
 위 검토과정에서는 각 월별 물부족에 대해 0.01, 최대 물부족에 대해 1.00의 PENALTY가 적용됨
 위 발전가중계수 0.5의 P=11, N=6에 해당하:는 출력결과:는 그림 5에 정리하였음

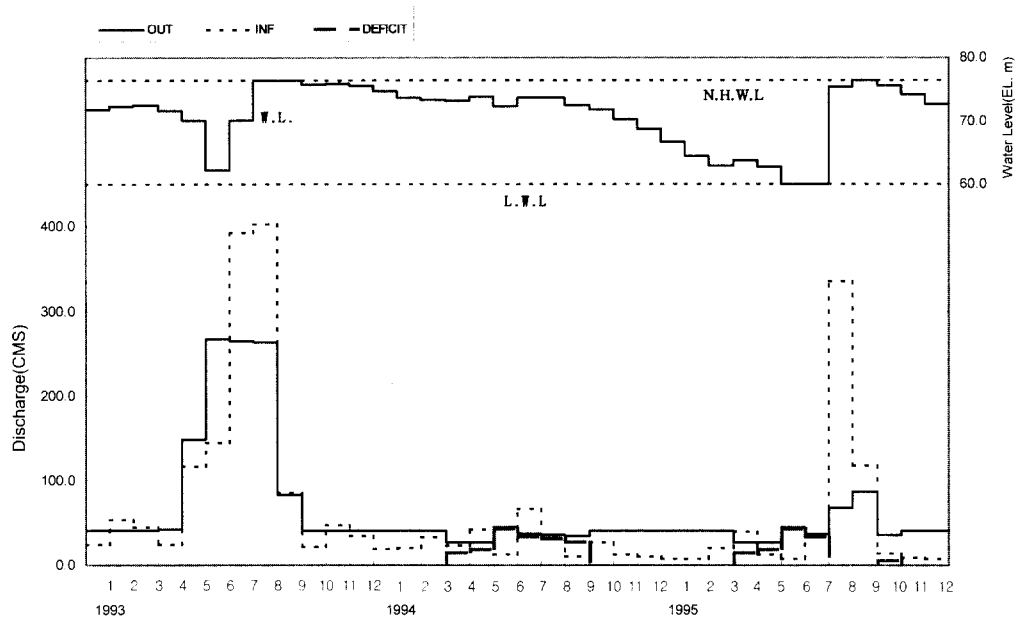


그림 5. 모형수행결과(P=11, N=6, 발전가중계수 0.5인 경우)

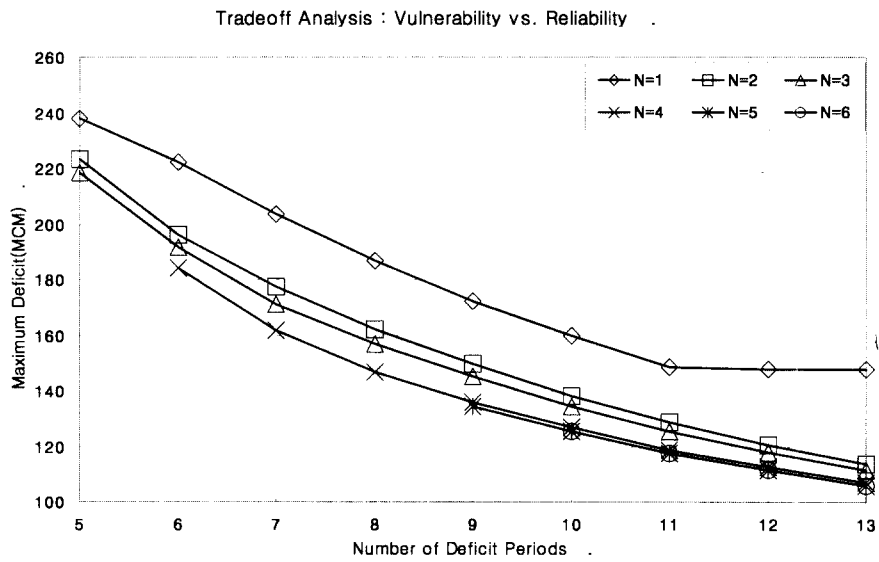


그림 6. 신뢰도와 부족심도간의 trade-off 곡선

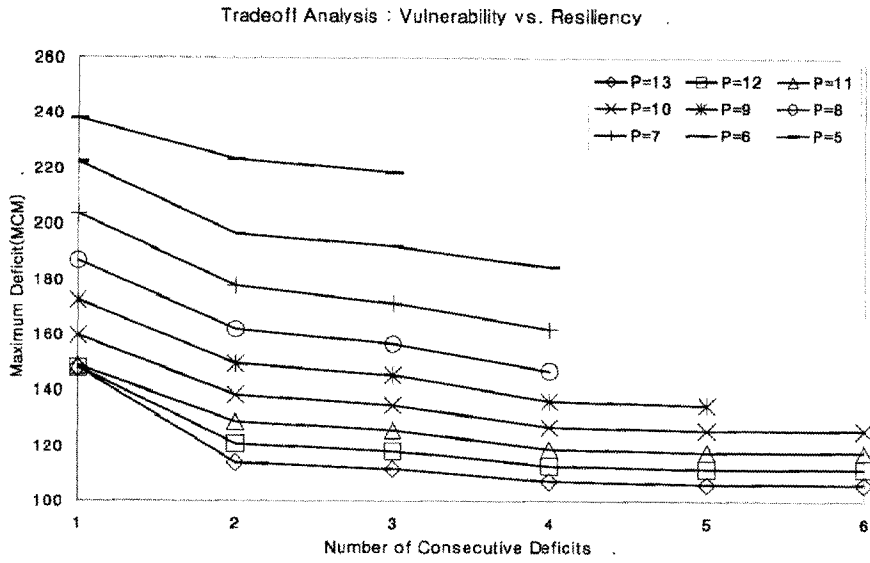


그림 7. 복원도와 부족심도간의 trade-off 곡선

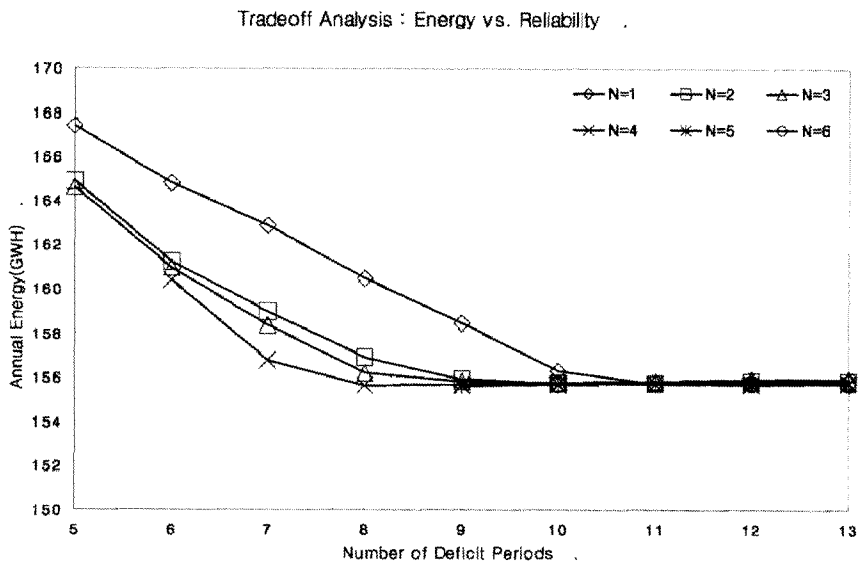


그림 8. 신뢰도와 연간발전량간 trade-off 곡선
(발전량 부분 가중계수 0.01)

Tradeoff Analysis : Energy vs. Resiliency

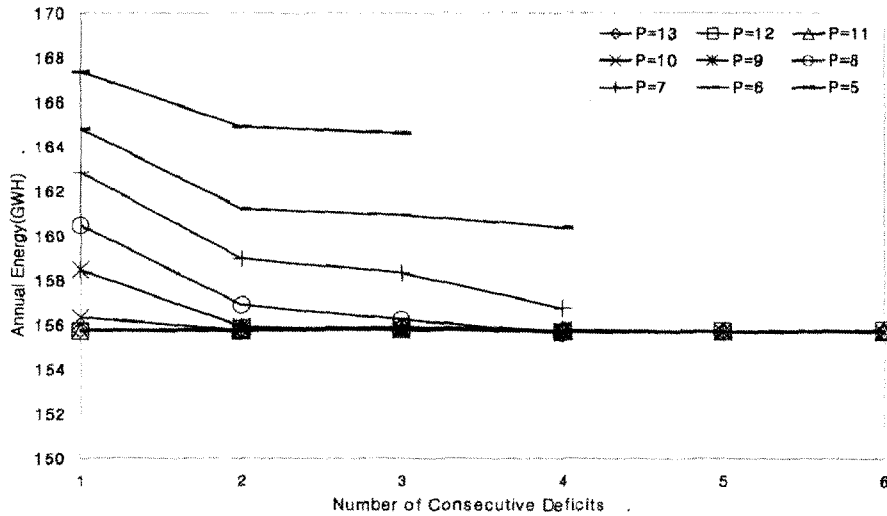


그림 9. 복원도와 연간발전량간 trade-off 곡선 (발전량 부분 가중계수 0.01)

있으며, 4회 이하의 총 물부족 횟수에 대해서는 infeasible 상황으로서 해를 구할 수 없었다. 이는 대청다목적댐의 유입-방류 저수용량 규모와 관련된 특성으로 판단된다. 모형 수행은 그림4와 같은 해찾기 과정을 통하여 수행되었으며, 발전함수와와의 trade-off 분석을 위하여 발전함수에 대한 가중치를 달리하며 수행되었다. 모형수행결과는 표 1에 정리하였다. 발전함수 가중치에 따른 각 수행결과중 대표적인 결과를 정리하였으며, 그림 4에 따른 해찾기 과정중 발전함수 가중치 0.5에 대한 사항을 별도로 정리하였다.

그림 5는 총 물부족발생 횟수(P)가 11, 지속된 최대 물부족 발생기간(N)이 6인 경우로서 '93년 홍수기 및 '95년 홍수기에 저수지의 상한선인 상시만수위까지 도달하게 되었다. 그리고 방류규모가 많은 6, 7, 8월중에 물부족이 발생하였는데 이는 식(28) 및 (29)에서 물부족발생량의 산정에 월별 용수수요비율을 적용하여 단위 방류량에 대한 상대적인 가치를 달리한 결과라고 판단된다.

용수 및 발전부분의 trade-off 분석을 위하여 발전부분의 가중계수를 변동시켜 검토하는 경우에도 용수부분의 신뢰도, 복원도, 부족심도에 대한 지수들은 변동이 없었으며, 이는 용수부분에 제약이 매우 크게 작용했기 때문으로 판단된다. 또한 '93~'95년중의 갈수기간을

대상으로 검토되었기 때문에 발전량의 증대를 위한 여유수량이 충분하지 않았던 것으로 판단된다. 그러나 발전량의 향상은 적은 양이지만 저수지 운영의 심각성이 약화됨에 따라 증가되는 것으로 나타났다. 즉 신뢰도의 향상 및 복원도의 향상에 따라 최대 물부족량(부족심도)은 약화되어지나 이와 함께 발전량은 증가되었다.

그림 6은 신뢰도와 부족심도간의 변동을 도시한 결과이다. Hashimoto 등(1982)과 Bayazit 등(1990)이 정리하였듯이 최대의 신뢰도와 최소의 부족심도는 동시에 확보할 수 없음을 보여준다. 또한 그림 7은 복원도와 부족심도간의 변동을 도시한 결과로서 복원도의 변동특성은 신뢰도 만큼 시스템이 큰 영향을 주지는 않으나 신뢰도와 유사한 움직임을 보임을 알 수 있다. 결국 Hashimoto 등(1982)이 정리했던 바와 같이 신뢰도와 복원도는 비슷한 변동 특성을 가지나 부족심도는 이들 두가지 기준과는 달리 변동하고 있다. 또한 그림 6과 7을 볼 때 최대 물부족의 감소 즉 신뢰도의 증가에 따라 최대 물부족량(부족심도)은 급격히 약화됨을 알 수 있다. 즉, 부족심도의 약화는 복원도에 의한 영향보다는 신뢰도에 의해 보다 예민하다. 이러한 신뢰도, 복원도, 부족심도의 변동특성은 발전량 가중계수의 변동에 관계없이 일정한 관계를 보였다.

마찬가지로 그림 8 및 그림 9를 볼 때 발전량 생산

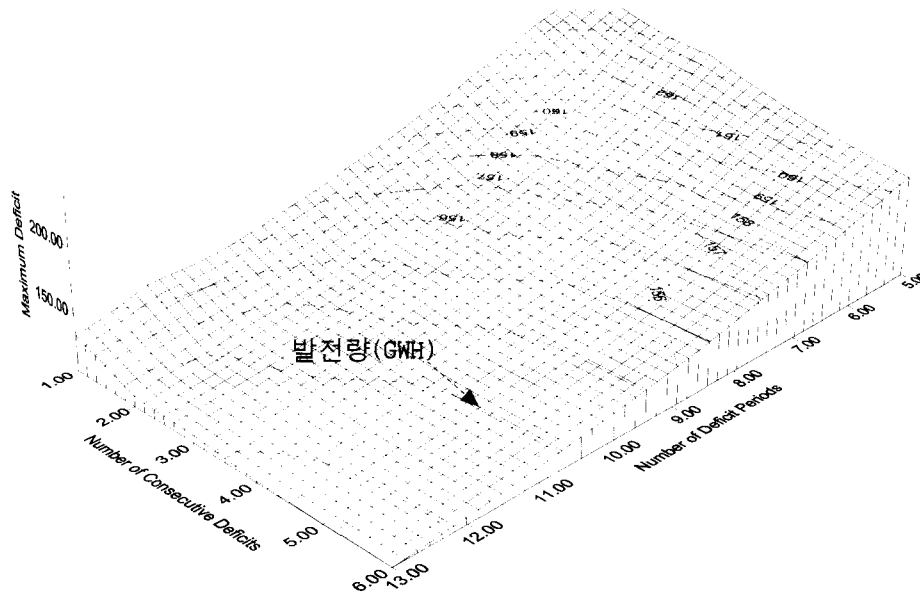


그림 10. 발전량과 평가기준간의 관계(발전량 가중계수 0.01)

은 복원도 보다는 신뢰도에 보다 많은 영향을 받는 것으로 판단할 수 있다.

그림 10은 앞에서 언급한 trade-off 분석 결과 중 발전량 가중계수 0.01에 대하여 3차원으로 도시한 결과이다. 최대 물부족이 증가되는 방향, 물공급의 신뢰도가 높아지는 방향, 그리고 연속 최대 물부족 기간이 짧아짐에 따라 발전량은 증가되는 것으로 검토되었다.

6. 결 론

Moy 등(1986)과 Srinivasan 등(1999)에 의해 연구된 용수공급을 위한 단일댐의 3가지 물부족에 대한 혼합정수계획법의 적용방법을 다목적댐에 대해 적용하기 위하여 목적함수 및 제약조건의 정식화 내용을 개선하였다. 목적함수에 추가한 수력발전의 비선형 문제해결을 위하여 축차선형계획기법을 병행 적용하여 신뢰도, 복원도, 부족심도의 3가지 물부족 기준을 혼합정수계획법에 의해 대청다목적댐의 '93~'95년 기간에 적용·분석하였다. 모형수행결과 대청다목적댐의 운영 최적화에 물부족 위험도를 고려한 3가지 평가기준을 발전량과 함께 검토할 수 있었다. 개발 모형을 통하여 기존의 용수 부족량을 최소화하고 발전량을 최대화하는 문제에 추가로 용수부족에 대한 발생 횟수 및 용수부족 발생의 지

속기간을 병행해 제어할 수 있었다. 이 방법은 금강 및 낙동강 수계와 같이 갈수기 수량부족이 심각한 수계내 댐군에 대한 용수공급능력 평가에 실용성이 크다고 판단되며, 저수량 부족에 따른 갈수상황이 심화되어가는 시점에서의 댐운영 의사결정 과정에서 효과적일 것으로 판단된다. 이상의 신뢰도, 복원도 및 부족심도를 고려한 물부족에 대한 계량화 방법은 가뭄재해 발생에 대응한 댐관리 기법의 개선에 폭넓게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- 김승권, 박영준 (1998). "댐군의 연계운전을 위한 수학적 모형". **한국수자원학회논문집**, 제31권, 제6호, pp. 779~793.
- 이규탁, 권오현, 고석구 (1995). "축차선형계획기법에 의한 수력 발전량의 최대화". **대한토목학회논문집**, 제15권, 제5호, pp. 1343~1349.
- 최영송, 안경수, 박명기 (2000). "MIP에 의한 댐군연계 운영 최적화모형 개발과 개발모형에 의한 낙동강수계 용수공급능력 재평가." **한국수자원학회논문집**, 제33권, 제4호, pp. 447~459.
- Bayazit, M., and Unal, N. E. (1990). "Effects of hedging on reservoir performance." *Water*

- Resour. Res.*, 26, 713~719.
- Datta, B., and Burges, S.J. (1984). "Short term, single, multiple-purpose reservoir operation: importance of loss functions and forecast error." *Water Resour. Res.*, 20, 1167~1176.
- Fiering, M. B. (1982). "Alternative indices of resilience." *Water Resour. Res.*, 18, 33~39.
- Grygier, J. C. and Stedinger, J. R. (1985). "Algorithms for optimizing hydropower system operation." *Water Resour. Res.*, 21(1), 1~10.
- Hashimoto, T. (1980). "Robustness, reliability, resilience and vulnerability criteria for planning water resources systems." Ph.D. dissertation, Cornell Univ., Ithaca, N. Y.
- Hashimoto, T., Stedinger, J. R., and Loucks, D. P. (1982). "Reliability, resilience and vulnerability criteria for water resources system performance evaluation." *Water Resour. Res.*, 18, 489~498.
- Joeres, E. F., Seus, G. J., and Engelmann, H. M. (1981). "The linear decision rule(LDR) reservoir problem with correlated inflow. I: Model development." *Water Resour. Res.*, 17, 18~24.
- Loucks, D. P., and Dorfman, P. J.(1975). "An evaluation of some linear decision rules in chance-constrained models for reservoir planning and operation." *Water Resour. Res.*, 11, 777~782.
- Loucks, D. P., Stedinger, J. R., and Haith, D. A. (1981). *Water resources systems planning and analysis*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Martin, Q. W. (1987). "Optimal daily operation of surface-water systems." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, 113(4), 453~469.
- Moy, W. (1983). "Reliability, resilience and vulnerability in reservoir operations." Ph.D. dissertation, The Johns Hopkins Univ., Baltimore, Md.
- Moy, W. S., Cohon, J. L., and ReVelle, C. S. (1986). "A programming model for analysis of the reliability, resilience, and vulnerability of a water supply reservoir." *Water Resour. Res.*, 22, 489~498.
- ReVelle, C. S., and Gundelach, J. (1975). "Linear decision rule in reservoir management and design. IV: A rule that minimizes output variance." *Water Resour. Res.*, 11, 197~203.
- ReVelle, C. S., and Joeres, E., and Kirby, W.(1969). "The linear decision rule in reservoir management and design. I: Development of the stochastic model." *Water Resour. Res.*, 5, 767~777.
- Shih, J. S., and ReVelle, C. S. (1994). "Water supply operations during drought: continuous hedging rule." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, 120, 613~629.
- Srinivasan, K., and Philipose, M. C. (1998). "Effect of hedging on over year performance." *Water Resour. Mgmt.*, 12, 95~120.
- Srinivasan, K., T. R. Neelakantan, P. Shyam Narayan, and C. Nagarajukumar (1999). "Mixed-integer programming model for reservoir performance optimization." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, 125(5), 298~301.
- Trezos, T. (1991). "Integer programming application for planning of hydropower production." *J. Water Resour. Plng. and Mgmt.*, 117(3), 340~351.
- Trott, W. J. and Yeh, W. W-G. (1971). "Multi-level optimization of a reservoir system." ASCE Annual Meeting.

(논문번호:01-031/접수:2001.04.10/심사완료:2001.12.18)