

단일 저수지의 위험도 평가기준을 고려한 가뭄대비
Hedging Rule 개발
Development of Hedging Rule for Drought Management Policy
Reflecting Risk Performance Criteria of Single Reservoir System

박 명 기* / 김 재 한** / 정 관 수***

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

Abstract

During drought or impending drought period, the reservoir operation method is required to incorporate demand-management policy rule. The objective of this study is focused to the development of demand reduction rule by incorporating hedging-effect for a single reservoir system. To improve the performance measure of the objective function and constraints, we could incorporate three risk performance criteria proposed by Hashimoto et al.(1982) by mixed-integer programming and also incorporate successive linear programming to overcome nonlinear hedging term from the previous study(Shih et al., 1994).

To verify this model, this hedging rule was applied to the Daechung multi-purpose dam. As a result, we could evaluate optimal hedging parameters and monthly trigger volumes.

keywords : drought management, hedging effect, successive linear programming, vulnerability, mixed-integer programming, trigger volume

요 지

가뭄상황 또는 가뭄이 임박한 상황에서의 저수지 운영은 수요관리개념(단계별 급수)에서의 운영률을 필요로 한다. 본 연구는 저수지 갈수대응 차원에서 수문상황에 따른 단계별 방류량 감소를 고려할 수 있는 hedging 효과를 고려한 단일 저수지 운영률 개발을 목표로 하였다. hedging 효과를 고려한 최적운영률 결정에는 혼합정수계획기법이 적용되었으며, 정식화단계에는 Shih 등(1994)의 hedging 효과를 고려한 운영률을 개선하여 정식화 요소에 Hashimoto 등(1982)의 위험도 평가기준을 포함시켰다. 또한 hedging 항의 비선형 해석을 수행하기 위하여 축차선형계획기법을 도입·정식화에 적용하였다.

* 한국수자원공사 물관리종합상황실 대리, 공학박사, 수자원개발기술사
Engineer, WRMC of KOWACO, Daejeon 306-711, Korea
(E-mail : mkpark@kowaco.or.kr)

** 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수, 공학박사
Professor, Dept. of Civil Eng., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea
(E-mail : kjh@cnu.ac.kr)

*** 충남대학교 공과대학 토목공학과 조교수, 공학박사
Assistant Prof., Dept. of Civil Eng., Chungnam National Univ., Daejeon 305-764, Korea
(E-mail : ksjung@cnu.ac.kr)

본 hedging 운영률의 적용결과 대청다목적댐에 대하여 hedging 매개변수를 산정하였으며, 이를 통하여 각 월별 갈수대용 제한공급 시점 저수량(trigger volume)을 산정할 수 있었다.

핵심용어 : 갈수대용, hedging 효과, 축차선형계획기법, 물부족심도, 혼합정수계획법, 제한공급 시점 저수량

1. 서론

평갈수기 댐관리에 있어서 가뭄과 같은 자연적 요인과 용수수요 변동 등 인위적인 요인들에 의해 물부족 기간은 빈번히 발생된다. 물부족 기간에 댐운영 또는 수요관리 측면에서의 물관리기법은 특히 중요성이 더욱 커지는데, 이러한 물부족 기간 동안의 피해를 계량화하는 것은 쉽지 않다. 결국 물관리는 예상 최대 물부족이나 물부족의 총량을 최소화하는 방향으로 타 목적의 운영에 우선하여 가뭄피해 절감방안을 수립하게 된다. 이러한 점에서 가뭄이 진행 또는 예상되는 시점에서의 댐운영은 정상적인 운영계획과는 별도로 수립되어야 한다. 그러나 기존 댐관리를 위한 의사결정지원시스템에는 가뭄기간을 대비한 객관적인 운영계획이 제공되지 않는 실정이다. 본 연구의 목적은 이러한 가뭄기간을 대비한 운영계획과 정상기간중의 운영계획을 접목시킬 수 있는 기반을 제공하는데 있다.

댐의 용수공급부분에 있어 최초의 운영방안을 구체화시킨 시도는 Bower 등(1962)에 의해서였다. 그는 댐군 모의운영을 위한 공간적 시간적 방류량 배분방식을 병렬댐에 대한 space rule, 홍수기 수문방류량을 줄이기 위한 pack rule, 그리고 극한 가뭄에 대비한 hedging rule의 3가지 형태로 제안한 바 있다. 1982년에 Hashimoto 등은 저수지 물부족을 물관리 모형에서 고려할 수 있는 3가지 기준(criteria)을 제시하였다. 이후 Moy 등(1986), Srinivasan 등(1999)의 연구를 통하여 물부족을 혼합정수계획기법으로 정식화할 수 있는 방법론이 제시되어 최적화 모형내에서 물부족을 포함하는 형태로 구현이 가능하게 되었고, 박명기 등(2002a, 2002b)은 국내 대청다목적댐 및 한강수계 5개 댐 연계운영문제로서 이들 3가지의 위험도 평가기준을 혼합정수계획기법으로 적용한 바 있다. 그러나 이러한 물부족에 대한 적정 대응방안을 제시할 만한 연구는 부진한 형편이며, 이러한 상황에서 물공급의 부족심도(vulnerability)를 줄여줄 수 있는 hedging rule의 적용방안에 대한 연구가 Shih 등(1994)에 의하여 단일 용수공급 목적 댐에 대하여 제시된 바 있다. 그러나 Shih 등(1994)의 연구는 목적함수에 물부족심도만을

최소화하는 hedging parameter를 제시하였다는 점과 비선형항의 선형화를 위한 해석기법에 문제를 가지고 있었다. 본 연구에서는 평가함수 구성에서는 박명기 등(2002a)이 대청댐에 대해 적용한 Hashimoto 등(1982)의 위험도 평가기준을 정식화 요소에 반영하였다. 또한 비선형 hedging 항의 고려를 위하여 축차선형 계획기법을 도입하여 단일댐에 대한 정식화를 수행하고 이를 대청다목적댐에 적용하여 적용성을 평가하였다.

2. 갈수대용 댐운영률의 정식화

2.1 Hedging을 고려한 댐운영률 연구사례

용수공급을 위한 단일댐의 일반적인 운영은 표준운영방안(standard operating rule)에 의해 설명될 수 있다. 그러나 실제운영여건은 hedging 및 pack에 의한 개념에 의해 적용되고 있으며, 용수공급능력에 대한 중요성을 감안하여 pack에 의한 적용사례는 다소 떨어지나 한국수자원공사 물관리센터(2001)의 가뭄대책업무수행시 저수지에 대한 단계별 용수공급계획은 hedging의 개념에 의하여 단계별로 감량공급되고 있는 것이 현실이다. 결국 hedging이란 댐방류량 결정과정에서 현재 상태에서는 저수지의 가용수량이 존재하여 해당시간의 감량공급계획이 필요하지 않더라도 향후 유입량이 가지는 불확실성 또는 예상되는 갈수에 대비하여 미리 계획공급량을 감량조절하는 것을 의미한다.

표준운영방안에 의한 저수지운영기법은 아래의 식(1)~(3)으로 표현된다.

$$R_t = S_{t-1} + I_t \quad \text{if } S_{t-1} + I_t \leq D_t \quad (1)$$

$$R_t = D_t \quad \text{if } D_t \leq S_{t-1} + I_t \leq S_{\max t} \quad (2)$$

$$R_t = S_{t-1} + I_t - S_{\max t} \quad \text{if } S_{t-1} + I_t - D_t > S_{\max t} \quad (3)$$

여기서, R_t : t월중 저수지 공급량(취수 및 방류량)

S_t : t월중 저수지 저수량(유효저수량 개념)

I_t : t월중 저수지 유입량

D_t : t월중 저수지 수요량
 S_{max_t} : t월중 저수지 저수량 상한선(유효저수량 개념)

Hashimoto 등(1982)은 위의 표준운영방안이 만일 목적함수가 전체 공급부족분을 최소화하는 목적함수로 구성되는 경우에 최적해에 해당한다고 결론지은 바 있다. 그러나 Stedinger 등(1984)은 이러한 표준운영방안은 물부족 상황이 발생하는 경우 또는 도래가 예상되는 경우에 적절한 운영을 위한 체계를 제공하지 못한다는 점과 여유수량이 존재하는 경우의 적절한 활용 절차를 제공하지 못한다는 단점을 제시하였다. 이러한 과정에서 Shih 등(1994)은 감량공급 시점 및 수량을 제시할 수 있는 hedging 효과를 고려하여 최대 물부족심도를 전체 용수공급의 입장에서 가능한 감소시킬 수 있다는 개념을 근거로 그림 1에서와 같이 감량공급이 시작되는 시점과 감량할 공급량을 결정할 수 있는 매개변수 $K_{p,t}$ 를 사용하는 방안을 제시하고, 이 갈수대응 저수지 운영방안을 혼합정수계획기법을 통하여 그림 1과 같이 제시하였다.

Shih 등(1994)은 그림 1과 같은 hedging을 고려한 운영률 산정을 물부족심도를 최소화하는 문제로 설정하여 혼합정수계획기법을 통해 식(4)~식(14)와 같이 정식화한 바 있다.

$$\min Z = M \quad (4)$$

subject to

$$R_t + UPS_t = (1/K_{p,t}) \cdot (S_{t-1} + \bar{I}_t) \quad \forall t \quad (5)$$

$$R_t + DEF_t = D_t \quad \forall t \quad (6)$$

$$DEF_t \leq M \quad \forall t \quad (7)$$

$$S_t \leq S_{max_t} \quad \forall t \quad (8)$$

$$S_n \geq S_0 \quad \forall t \quad (9)$$

$$b_t \leq S_t / S_{max_t} \quad \forall t \quad (10)$$

$$W_t \leq b_t \times B \quad \forall t \quad (11)$$

$$S_t - S_{t-1} + R_t + W_t = I_t \quad \forall t \quad (12)$$

$$b_t = 0 \text{ or } 1 \quad \forall t \quad (13)$$

$$S_t, W_t, R_t, UPS_t, DEF_t, K_{p,t} \geq 0 \quad \forall t \quad (14)$$

여기서, M : 운영기간중 최대 물부족 발생량
 \bar{I}_t : t월중 저수지 예상 유입량

UPS : t월중 잉여방류능력(그림 1참조)

DEF : t월중 물부족량(그림 1참조)

W_t : t월중 수문방류량

b_t : t월중 수문방류량 발생을 표시하는 정수형 변수

B : 충분히 큰 값

$K_{p,t}$: t월중 hedging 매개변수

또한 식(5) 및 (6)에서의 UPS_t 및 DEF_t 에 대한 관계설정을 위하여 식(15) 및 식(16)이 제안된 바 있다.(Shih 등, 1994)

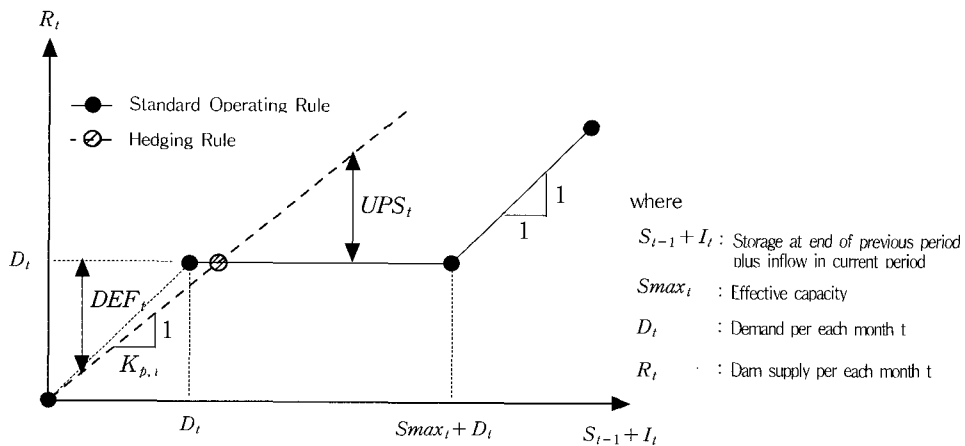


그림 1. Hedging을 고려한 저수지운영기법

$$UPS_t - B \cdot ISU_t \leq 0 \quad \forall t \quad (15)$$

$$DEF_t + B \cdot ISU_t \leq B \quad \forall t \quad (16)$$

여기서, $ISU_t : 0, 1$ 정수형 변수로서 물수요가 만족된 경우 1

2.2 해석기법 개선

식(4)~식(16)의 정식화를 통한 Shih 등(1994)의 연구는 식(5)가 가지는 hedging 항의 비선형에 대한 처리기법과 부족심도만을 평가기준에 고려한 부분에 문제가 있다. 본 연구에서는 비선형성에 대한 처리기법은 이규탁 등(1995)이 수력발전 최적화에 적용했던 축차선형계획기법(Successive Linear Programming)의 개념을 적용하여 선형화시키고, 부족심도만을 고려한 목적함수 설정부분에는 박명기 등(2002a)이 다목적대역에 적용했던 위험도 평가기준을 적용하도록 정식화를 개선하였다.

2.2.1 축차선형계획기법의 도입

Shih 등(1994)은 식(5)의 선형화를 위하여 반복연산을 전제로 식(17)을 제안하고 이에 대한 해석절차를 그림 2와 같이 제안한 바 있다.

$$R_t + UPS_t = \overline{H_{p,k}} \cdot S_{t-1} + H_{p,k+1} \overline{I_t} \quad \forall t \quad (17)$$

여기서, $H_{p,k}$: 반복연산 k번째의 $1/K_{p,t}$ (단, $\overline{H_{p,k}}$ 는 이전 단계로 부터의 입력치)

그러나 본 연구에서는 국내 다목적댐 관리에 비교적 적용경험이 많고 비선형문제 해석에 대한 선형화 적용기법의 일종으로 비교적 많이 알려진 축차선형계획기법을 통하여 정식화를 시도하였다.

비선형함수($H_t \cdot S_{t-1}$)와 그 모든 편도함수가 $H_t = H_t^*$, $S_{t-1} = S_{t-1}^*$ 의 인근에서 연속이면, 초기치 [H_t^* , S_{t-1}^*]에 대하여 Taylor 급수전개하여 2차항 이상을 무시하면 식(18)과 같이 표시할 수 있다.

$$\begin{aligned} f(H_t^*, S_{t-1}^*) &= H_t \cdot S_{t-1} \quad (18) \\ &\approx f(H_t^*, S_{t-1}^*) + \frac{\partial f(H_t^*, S_{t-1}^*)}{\partial H_t} \cdot (H_t - H_t^*) \\ &\quad + \frac{\partial f(H_t^*, S_{t-1}^*)}{\partial S_{t-1}} \cdot (S_{t-1} - S_{t-1}^*) \end{aligned}$$

여기서, * : 이전단계 연산과정으로 부터의 출력치

결과적으로 식(19)와 같은 중간단계를 거쳐, hedging rule을 포함한 비선형항을 포함하는 식(6)은 식(20)과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned} H_t \cdot S_{t-1} &= H_t^* \cdot S_{t-1}^* + S_{t-1}^* \cdot (H_t - H_t^*) \\ &\quad + H_t^* \cdot (S_{t-1} - S_{t-1}^*) \quad (19) \end{aligned}$$

$$-R_t + (S_{t-1}^* + I_t) \cdot H_t + H_t^* \cdot S_{t-1} - UPS_t = H_t^* \cdot S_{t-1}^* \quad (20)$$

그러나 식(20)은 유효저수량 개념의 S_{t-1} 에 대한 유도결과로서 일반적인 저수량 개념(STO_{t-1})으로 적용할 경우, 식(21)을 거쳐 최종적으로 식(22)를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} -R_t + (STO_{t-1}^* + I_t - DSTO) \cdot H_t + H_t^* \cdot \\ (STO_{t-1} - DSTO) - UPS_t = H_t^* \cdot (STO_{t-1}^* - DSTO) \quad (21) \end{aligned}$$

```

Step 1 : Input  $H_{p,k}$  , scale factor  $\alpha$ , precision  $\epsilon$ 
Step 2 : Run MIP-module and check following condition
[if] ABS[  $H_{p,k+1} - H_{p,k}$  ]  $\leq \epsilon$  then
    goto Step 3
[else]
     $H_{p,k+1} = \alpha H_{p,k} + (1 - \alpha) H_{p,k+1}$ 
    goto Step 1
Step 3 : Print out all variables
    
```

그림 2. 반복연산 과정

$$-R_t + (STO_{t-1}^* + I_t - DSTO) \cdot H_t + H_t^* \cdot STO_{t-1} - UPS_t = H_t^* \cdot STO_{t-1}^* \quad (22)$$

단, DSTO : 댐의 저수위(LWL)이하 저수량
 STO_{t-1} : $S_{t-1} + DSTO$

또한 식(22)의 수렴성 보장을 위하여 hedging 매개 변수 및 저수량 변동에 대한 변동폭(step-size) 제약이 식(23) 및 식(24)과 같이 필요하다.

$$-\Delta H \leq \frac{H_t - H_t^*}{H_t^*} \leq +\Delta H \quad (23)$$

$$-\Delta S \leq \frac{STO_t - STO_t^*}{STO_t^*} \leq +\Delta S \quad (24)$$

2.2.2 위험도 평가기준의 도입

Hashimoto 등(1982)에 의해 처음으로 제시된 저수지 운영의 3가지 수행 평가기준은 물공급에 대한 신뢰도, 복원도, 부족심도로서 정의되었다. 이들을 저수지 최적운영모형에서 도입하기 위한 시도는 Moys 등(1986)에 의한 혼합정수계획기법으로의 개발이 있었으며, Srinivasan 등(1999)은 Moys 등(1999)의 정식화 요소에 복원도를 평균 복원률 개념으로 고려할 수 있도록 정식화를 개선한 바 있다. 또한 박명기 등(2002a, 2002b)은 다목적 댐에 대하여 이들 평가기준 정식화 기법을 수력발전합수를 포함하여 정식화시킴으로서 그 효율성을 검증한 바 있고 한강수계 5개댐 군으로 그 대상을 확장하여 적용한 바 있다. 본 연구에서는 대청댐에 대한 박명기 등(2002a)의 정식화 연구결과중 복원도와 신뢰도에 대한 제약식을 추가하고 목적함수에 평균 물부족량을 추가하여 hedging rule개발에 적용하였다.

식(15)에서의 ISU_t 와 연계할 물부족 발생을 나타낼 0,1 정수형 변수인 Y_t 를 도입하여 식(25)를 정의하면,

$$ISU_t + Y_t = 1 \quad \forall t \quad (25)$$

신뢰도를 고려한 제약식은 식(26)과 같으며, 복원도의 제약식은 식(27)과 같이 정리된다.

$$\sum_{t=1}^n Y_t = p \quad (26)$$

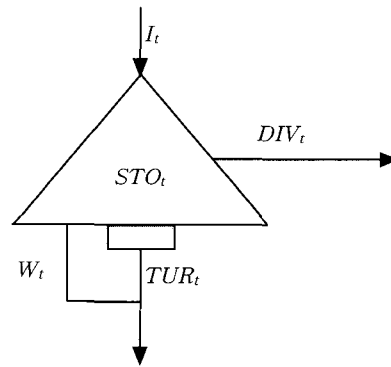
$$\sum_{t=k}^{k+N} Y_t \leq N \quad K=1, 2, \dots, (n-N) \quad \forall t \quad (27)$$

여기서, Y_t : 물부족 발생을 알리는 0, 1 정수형 변수
 p : 물공급 발생에 관한 상한치
 N : 연속 최대 물부족 발생기간

3. 대청댐의 갈수대응 운영률 유도

3.1 운영률 산정을 위한 모형 정식화

본 연구에서 고려된 대청댐의 저수지시스템 정의는 그림 3과 같다.



여기서,
 I_t : 저수지 유입량
 STO_t : 저수지 저수량
 TUR_t : 저수지 발전 사용수량
 W_t : 저수지 수문 방류량
 DIV_t : 대전·청주지역 도수량

그림 3. 저수지 시스템 정의(대청댐)

목적함수는 전체 연간 물부족량에 대한 항이 목적함수에 추가되어 식(28)과 같이 정리되었으며, 제약조건은 식(29)~식(52)에 정리하였다.

$$\min Z = 1.0 \cdot M + 0.01 \cdot AD \quad (28)$$

subject to

$$STO_t - STO_{t-1} + DIV_t + TUR_t + W_t = I_t \quad \forall t \quad (29)$$

$$-R_t + (STO_{t-1}^* + I_t - DSTO) \cdot H_t + H_t \cdot (STO_{t-1} - DSTO) - UPS_t \quad \forall t \quad (30)$$

$$R_t + DEF_t = D_t \quad \forall t \quad (31)$$

$$UPS_t - B \cdot ISU_t \leq 0 \quad \forall t \quad (32)$$

$$DEF_t + B \cdot ISU_t \leq B \quad \forall t \quad (33)$$

$$ISU_t + Y_t = 1 \quad \forall t \quad (34)$$

$$R_t = TRB_t + DIV_t \quad \forall t \quad (35)$$

$$DIV_t \leq DIV_{max,t} \quad \forall t \quad (36)$$

$$DIV_t - DIV_{max,t} \cdot IDV_t \geq 0 \quad \forall t \quad (37)$$

$$TUR_t - T_{max,t} \cdot IDV_t \leq 0 \quad \forall t \quad (38)$$

$$TUR_t = TRB_t + EXC_t \quad \forall t \quad (39)$$

$$TUR_t \leq T_{max,t} \quad \forall t \quad (40)$$

$$TUR_t \geq ITV_t \cdot T_{max,t} \quad \forall t \quad (41)$$

$$DEF_t \leq M \quad \forall t \quad (42)$$

$$\sum_{i=1}^n Y_i = p \quad \forall t \quad (43)$$

$$\sum_{i=K}^{K+N} Y_i \leq N \quad K=1,2,\dots,(n-N) \quad \forall t \quad (44)$$

$$AD = \frac{1}{N_{year}} \sum_{i=1}^n DEF_t \quad \forall t \quad (45)$$

$$Smin_t \leq STO_t \leq Smax_t \quad \forall t \quad (46)$$

$$STO_n \geq STO_0 \quad \forall t \quad (47)$$

$$b_t \leq STO_t / Smax_t \quad \forall t \quad (48)$$

$$W_t \leq ITV_t \cdot B \quad \forall t \quad (49)$$

$$W_t \leq b_t \cdot B \quad \forall t \quad (50)$$

$$-\Delta H \leq \frac{H_t - H_t^*}{H_t^*} \leq +\Delta H \quad \forall t \quad (51)$$

$$-\Delta S \leq \frac{STO_t - STO_t^*}{STO_t^*} \leq +\Delta S \quad \forall t \quad (52)$$

여기서,

M : 운영기간중 최대 물부족 발생량

AD : 운영기간중의 연평균 물부족 발생량

STO_t : t월 종점의 저수량(상한 및 하한치는 각각 Smax_t, Smin_t)

R_t : t월중 물공급 계획량(여수로 및 수요량 이상의 방류는 제외)

W_t : t월중 수문방류량

H_t : t월중 hedging 매개변수(1/K_{p,t})

TRB_t : t월중 수요량 개념에 의한 사용수량

DIV_t : t월중 상류 취수량(상한치는 DIV_{max,t})

IDV_t : t월중 상류 취수량의 만족여부에 대한 0,1 정수형 변수

D_t : t월중 목표 공급량(물수요로 취급)

UPS_t : t월중 잉여방류능력

DEF_t : t월중 물부족량

ISU_t : t월중 물부족 발생에 대한 0,1 정수형 변수

TUR_t : t월중 사용수량(상한치는 T_{max,t})

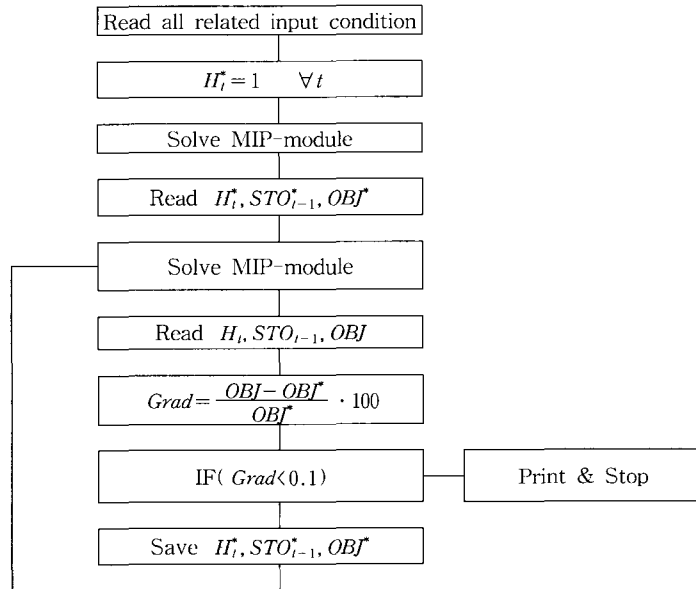


그림 4. SLP-MIP 모형의 수행과정

- ITV_t : t월중 사용수량의 상한치 도달여부에 대한 0,1 정수형 변수
- EXC_t : t월중 수요량 이상(以上)의 사용수량
- b_t : t월중 수문방류량 발생을 표시하는 0,1 정수형 변수
- B : 물부족, 수문방류량을 표현할 수 있는 충분히 큰 값
- Y_t : 물부족 발생을 알리는 0, 1 정수형 변수
- p : 물공급 발생에 관한 상한치
- N : 연속 최대 물부족 발생기간

위 식들 중에서 식(35)는 발전사용수량의 처리를 위하여 보완되었으며, 이와 함께 식(39)~식(41) 및 식(49)가 추가되었다. 식(36)~식(38)은 상류 취수량의 우선순위 고려를 위한 정식화 요소로서 박명기 등(2002a)과 마찬가지로 고려되었다.

3.2 해석 과정

본 연구에서 적용된 SLP-MIP 모형의 프로그램 흐름도는 그림 4에 정리하였으며, 반복 계산을 위해 설정된 식(51) 및 식(52)의 변동폭인 $\Delta H, \Delta S$ 는 반복연산 과정을 통하여 각기 20%로 적용하였다. 해석을 위한 목적함수의 계수치는 Moys 등(1986)의 연구에서 적용한 바와 같이 최대 물부족량에는 1.0, 평균 물부족량에는 0.01을 적용하였으며, hedging 매개변수에 대한 변동범위는 대청댐의 저류능력을 고려하여 0.3~1.5로서 한정하였다.

분석은 대청댐 준공이후 운영기간인 1981년~2000년(20년간)에 대하여 수행되었으며, 월별 운영단위로 적용되었다.

4. 수행 결과 및 고찰

4.1 수행결과

그림 5는 총 물부족 발생기간(P)이 7, 최대 연속 물

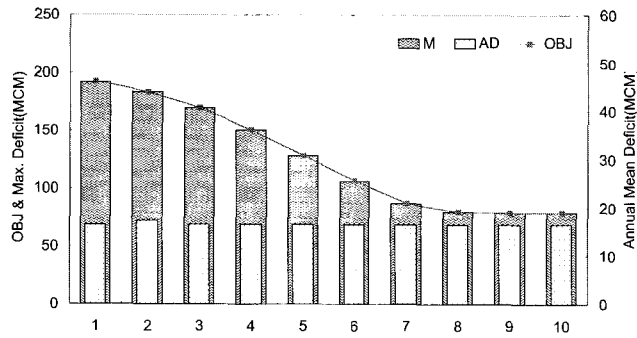


그림 5. 반복연산에 따른 수렴상황

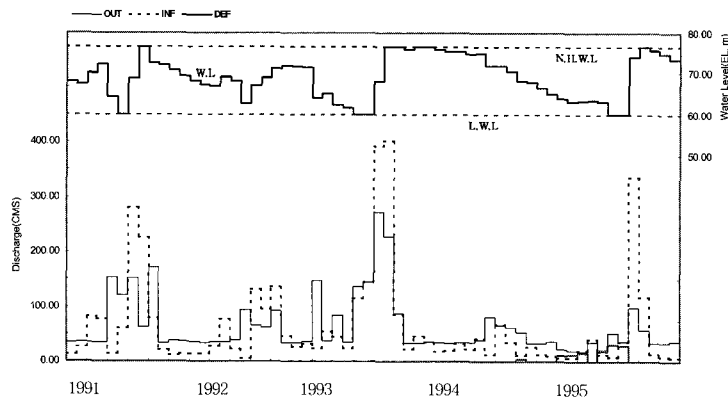


그림 6. 대청댐 운영결과(1991~1995년)[P=7, N=3인경우]

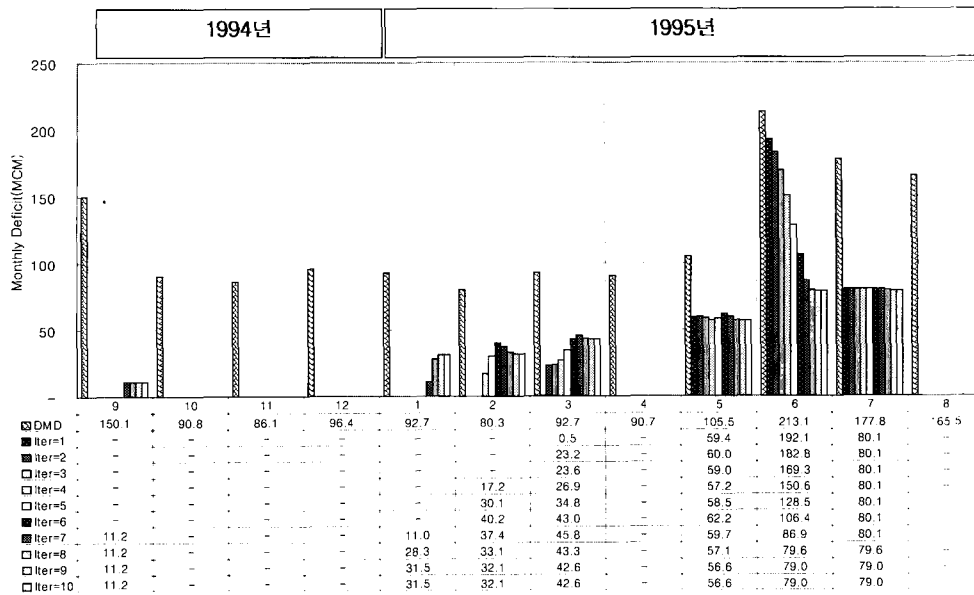


그림 7. 반복연산에 따른 월별 물부족 변화(P=7, N=3인 경우)

부족 기간(N)이 3인 경우에 대한 수행상황으로서 반복 연산에 따른 최대 물부족량 및 연평균 물부족량의 변동을 나타낸다. 연평균 물부족량은 최대 물부족량에 비해 진동하는 경향을 보이나 전체적인 목적함수의 거동은 안정적임을 알 수 있다.

그림 6은 20년 전기간에 대한 분석으로 부터 물부족이 발생했던 1991년~1995년까지의 운영체적을 도시한 것으로서 물부족의 발생은 제약조건으로 부여된 총 물 부족 발생기간 7개월, 연속 최대 물부족 발생기간 3개월의 조건이 반영된 것을 볼 수 있으며, 1994년 9월과 1995년 1월, 2월, 3월, 1995년 4월, 5월, 6월에 물부족이 발생되는 것으로 나타났다.

그림 7은 1994년 9월부터 1995년 8월 홍수전까지의

운영결과로서 반복연산에 따른 최대 물부족심도의 변화를 나타낸다. 수렴과정에 따라 물부족이 양호하게 수렴되어가는 과정임을 판단할 수 있다.

표 1은 본 개발모형의 운영결과로서 반복연산에 따른 물부족심도, 연평균 물부족량, 월별 hedging 매개변수들을 정리하였다.

4.2 Trade-off 분석 및 제한공급 시점 저수량 (Trigger volume) 산정

4.2.1 Trade-off 분석

개발모형에 의한 대청댐의 적정 제한공급시점 저수량을 산정하기 전에 우선 trade-off 분석을 실시하였다. 표준운영방안에 의한 최소 P(물부족 발생 횟수) 및

표 1. 반복횟수별 hedging 매개변수 및 위험도 평가기준 변동(P=7, N=3인 경우)

ITER	Monthly Hedging Parameters												Performance Criteria			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Max D	Ann D	P	N
1	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	192.1	16.6	5	3
2	0.81	0.80	0.91	0.80	0.80	1.00	1.00	0.80	0.80	0.80	1.00	0.80	182.8	17.3	5	3
3	0.65	0.67	0.72	0.70	0.64	1.00	1.00	0.64	0.64	0.64	0.80	0.64	169.3	16.6	4	3
4	0.52	0.53	0.58	0.67	0.51	1.00	1.00	0.64	0.51	0.51	0.64	0.51	150.6	16.6	5	3
5	0.59	0.43	0.46	0.54	0.41	1.00	1.00	0.65	0.41	0.41	0.51	0.51	128.5	16.6	6	3
6	0.50	0.34	0.37	0.61	0.32	1.00	1.00	0.52	0.32	0.32	0.41	0.41	106.4	16.6	6	3
7	0.40	0.30	0.30	0.58	0.30	1.00	1.00	0.48	0.30	0.39	0.32	0.34	86.9	16.6	7	3
8	0.32	0.30	0.30	0.55	0.30	1.00	1.00	0.56	0.30	0.47	0.30	0.34	79.6	16.6	7	3
9	0.30	0.30	0.30	0.61	0.30	0.99	1.00	0.48	0.30	0.37	0.30	0.34	79.0	16.6	7	3
10	0.30	0.30	0.30	0.66	0.30	1.00	1.00	0.48	0.30	0.30	0.30	0.34	79.0	16.6	7	3

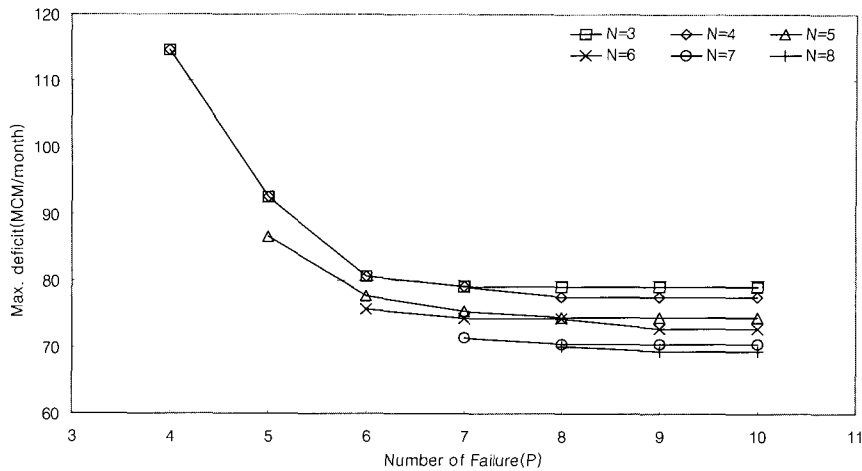


그림 8. 위험도 평가기준간 trade-off 곡선

표 2. 월별 제한공급 시점 저수량 및 상당 저수위(N=3인 경우)

Items	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	
Target Supply(MCM)	92.7	80.3	92.7	90.7	105.5	213.1	177.8	165.5	150.1	90.8	86.1	96.4	
Hedging Parameter	P=4	1.000	0.678	0.300	0.646	0.300	1.000	1.000	0.482	0.356	0.436	0.427	0.413
	P=5	0.510	0.300	0.300	0.553	0.300	0.999	1.000	0.477	0.390	0.396	0.389	0.452
	P=6	0.300	0.300	0.300	0.418	0.300	1.000	1.000	0.505	0.324	0.300	0.300	0.359
	P=7	0.300	0.300	0.300	0.659	0.300	1.001	1.000	0.476	0.300	0.300	0.300	0.343
	P=8	0.300	0.300	0.300	0.650	0.300	0.993	1.000	0.476	0.300	0.300	0.300	0.343
Trigger Volume (MCM)	P=4	92.7	118.5	308.9	140.4	351.8	213.1	177.8	343.4	421.6	208.3	201.5	233.5
	P=5	181.7	267.7	308.9	164.1	351.8	213.3	177.8	347.0	384.8	229.3	221.2	213.3
	P=6	308.9	267.7	308.9	217.0	351.8	213.1	177.8	327.8	463.2	302.7	286.8	268.6
	P=7	308.9	267.7	308.9	137.7	351.8	212.8	177.8	347.7	500.3	302.7	286.8	281.1
	P=8	308.9	267.7	308.9	139.6	351.8	214.6	177.8	347.7	500.3	302.7	286.8	281.1
Trigger W.L. (EL.m)	P=4	62.62	63.30	67.85	63.87	68.78	65.65	64.80	68.60	70.21	65.54	65.38	66.13
	P=5	64.90	66.92	67.85	64.46	68.78	65.66	64.80	68.68	69.47	66.03	65.84	65.66
	P=6	67.85	66.92	67.85	65.75	68.78	65.65	64.80	68.26	71.01	67.71	67.35	66.94
	P=7	67.85	66.92	67.85	63.80	68.78	65.65	64.80	68.69	71.71	67.71	67.35	67.22
	P=8	67.85	66.92	67.85	63.84	68.78	65.69	64.80	68.69	71.71	67.71	67.35	67.22
P=9	67.85	66.92	67.85	63.78	68.78	65.70	64.80	68.68	71.71	67.71	67.35	67.18	

N(연속 물부족 발생횟수)를 기준으로 점차 수치를 늘려가며 개발 모형을 수행하였다. 모형 수행은 P=10, N=8까지 반복수행되었으며, 이때 얻어진 신뢰도를 나타내는 P, 복원도를 표현하는 N, 물부족심도를 표현하는 M과의 관계를 N의 계열별로 정리하여 그림 8에 도시하였다.

그림 8을 볼때, Hashimoto 등(1982)이 언급한 바와 같이 신뢰도는 복원도와 유사한 움직임을 보이나 물부족심도는 이들과 반대 방향으로 움직임을 알 수 있다. 결국 물부족심도의 최소화는 저수지의 물부족 횟수 증가와 물부족으로부터 벗어날 확률을 저하시키게 되어 신뢰도 및 복원도의 저하를 초래한다. 그림 8의 이행도

곡선을 볼때, 최저의 연속 물부족 기간에 대한 경우는 N=3인 경우이며, P=7부터는 제약이 심해질수록 물부족심도가 급격히 상승하는 경향을 보인다. 따라서 본 연구에서는 최적의 운영기준을 P=7, N=3인 경우로 판단하였다.

물공급의 감량이 시작되는 시점인 제한공급 시점 저수량을 결정하기 위하여 최적 운영에서 결정된 hedging 매개변수를 적용하였으며, 산정결과 N=3에 대하여 일련의 P값 변화에 따라 표 2에 정리하였다.

5. 결론

Shih 등(1994)의 hedging에 의한 연구내용에서 평

가기준과 해석기법을 개선하였다. 정식화 요소중 물부족심도의 평가에 Hashimoto 등(1982)의 신뢰도 및 복원도를 추가하여 정식화 요소에 반영하였으며, hedging항의 비선형성 해석에 축차선형계획기법을 적용하여 비선형 매개변수 산정을 시도하였다. 개발된 모형은 금강수계 대청다목적댐에 대하여 20년간의 월별 운영에 적용하였다. 모형수행결과로 부터 hedging 매개변수의 안정적 수렴상황을 확인할 수 있었으며, 각 월별 제한 공급 시점 저수량을 산정하였다.

산정된 hedging 매개변수를 통한 운영률은 향후 가뭄대책과 연관된 댐 방류계획수립에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 개념은 아직 단일 댐에 대한 운영률로 제시된 것으로서 수계 연계운업을 고려한 정식화 기법 부분과 hedging에 따른 수력발전편의 저하 여부 등에 대한 후속 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

박명기, 김재한, 정관수 (2002a). "위험도 평가기준을 적용한 저수지 최적운영방안 연구 (I) (대청댐을 중심으로)." **한국수자원학회논문집**, 제35권, 제1호, pp. 37~49.

박명기, 김재한, 정관수 (2002b). "위험도 평가기준을 적용한 저수지 최적운영방안 연구 (II) (한강수계를 중심으로)." **한국수자원학회논문집**, 제35권, 제1호, pp. 51~64.

박명기 (2001). **위험도 평가기준을 적용한 저수지군 최적운영방안**. 박사논문, 충남대학교.

이규탁, 권오현, 고석구 (1995). "축차선형계획기법에 의한 수력 발전량의 최대화". **대한토목학회논문집**, 제15권, 제5호, pp. 1343~1349.

최영송, 안경수, 박명기 (2000). "MIP에 의한 댐군연계운영 최적화모형 개발과 개발모형에 의한 낙동강수계 용수공급능력 재평가." **한국수자원학회논문집**, 제33권, 제4호, pp. 447~459.

한국수자원공사 물관리센터 (2001). "2001년 가을가뭄대비 용수공급대책", 내부 검토 보고서, 9월 28일.

Bayazit, M., and Unal, N. E. (1990). "Effects of hedging on reservoir performance." *Water*

Resour. Res., 26, 713~719.

Grygier, J. C. and Stedinger, J. R. (1985). "Algorithms for optimizing hydropower system operation." *Water Resour. Res.*, 21(1), 1~10.

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.

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.

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., 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.

Stedinger, J. R., Sule, B. F., and Loucks. D. P. (1984). "Stochastic Dynamic Programming Models for reservoir operation optimization." *Water Resour. Res.*, 20(11), 1499~1505.

(논문번호:01-084;접수:2001.12.20/심사완료:2002.08.21)