

Hedging Rule을 적용한 가뭄대비 다목적댐 운영률 개발

○박명기*, 김재한**, 정관수***

1. 서 론

댐관리에 있어서 물부족 기간은 빈번히 발생된다. 운영 또는 수요관리측면에서의 물관리기법은 특히 이러한 물부족 기간에 중요해 지는데, 이러한 물부족 기간 동안의 피해를 계량화하는 것은 쉽지 않다. 결국 물관리자는 예상 최대 물부족이나 물부족의 총량을 최소화하는 방향으로 타 목적의 운영에 우선하여 피해 절감방안을 수립하게 된다. 이러한 점에서 가뭄이 진행 또는 예상되는 시점에서의 댐운영은 정상적인 운영계획과는 별도로 수립되어져야한다. 기존 댐관리를 위한 의사결정지원시스템에는 이러한 이수안전도에 따른 댐용수공급의 안전성에 대하여 가뭄기간을 대비한 운영계획이 제공되어지지 못하였다. 본 연구에서는 이러한 가뭄기간을 대비한 운영계획과 정상기간중의 운영계획을 접목시키고자 시도하였다.

댐의 용수공급부분에 있어 최초의 운영방안을 구체화시킨 시도는 Bower 등(1962)에 의해서 였다. 그는 댐군 모의운영을 위한 공간적 시간적 방류량 배분방식을 space, pack, hedging rule의 3가지 형태로 제안한 바 있다. 1982년에 Hashimoto 등은 저수지 물부족을 물관리 모형에서 고려할 수 있는 3가지 기준(criteria)를 제시하였다. 이후 Moy 등(1986), Srinivasan 등(1999)의 연구를 통하여 물부족을 혼합정수계획기법으로 정식화할 수 있는 방법론이 제시되어 최적화모형내에서 물부족을 포함하는 형태로 구현이 가능하게 되었으나 이러한 물부족에 대한 대응방안을 제시할 만한 연구는 뒤따르지 않았다. 이러한 상황에서 물공급의 부족심도(vulnerability)을 줄여줄 수 있는 hedging rule에 대한 연구가 Shih 등(1994)에 의하여 단일 용수공급 목적의 댐에 대해 이루어진 바 있다. 본 연구에서는 이러한 Shih 등(1994)의 연구에 기초하여 금강수계 대청 다목적댐에 대한 물공급의 부족심도(vulnerability)를 줄여줄 수 있는 hedging효과를 고려한 운영률을 개발하고 이를 이용하여 갈수대응 저수지상황을 판단할 수 있는 trigger volume을 산정하였다.

* 충남대학교 대학원 토목공학과 박사과정수료, 한국수자원공사 물관리종합상황실

** 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수, 공학박사

*** 충남대학교 공과대학 토목공학과 조교수, 공학박사

2. Hedging을 고려한 최적화 모형의 도입

표준운영방안(standard operating rule)에 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(1984)는 이러한 표준운영방안은 물부족의 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 과정을 통하여 Shih 등(1994)은 hedging의 효과를 고려한 갈수대응 저수지 운영방안을 혼합정수계획기법을 통하여 그림 1과 같이 제시하였다.

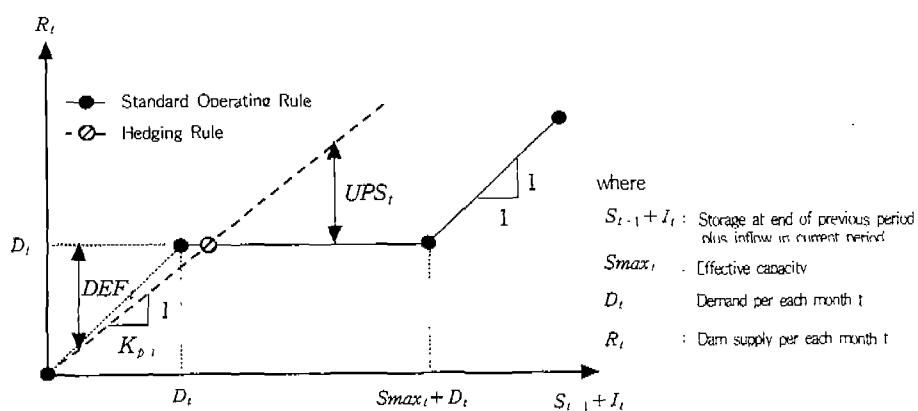


그림 1. hedging을 고려한 저수지 운영기법

Shih 등(1994)은 hedging을 고려한 운영기법을 물부족심도를 최소화하는 문제로 설정하여 아래와 같이 정식화한 바 있다.

$$\min Z = D_{max} \quad (4)$$

subject to

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

여기서, D_{max} : 운영기간중 최대 물부족 발생량

\bar{I}_t : t월중 저수지 유입 예상량

UPS_t : t월중 잉여방류능력(그림 1참조)

DEF_t : t월중 물부족량(그림 1참조)

W_t : t월중 수문방류량

b_t : t월중 수문방류량 발생을 표시하는 정수형 변수

B : 수문방류량을 표현할 수 있는 충분히 큰 값

$K_{p,t}$: t월중 hedging 계수

3. 대청댐 적용을 위한 정식화 및 해석기법

대청댐 운영을 위한 정식화는 2절에서의 Shih 등(1994)의 정식화결과에 수력발전량을 고려하기 위하여 식(6)을 식(15)와 같이 수정하였고 상류 취수량을 고려하여 식(16)~(18)을 추가하였다.

$$R_t + DEF_t \geq D_t \quad \forall t \quad (15)$$

$$R_t - X_t - DIV_t = 0 \quad \forall t \quad (16)$$

$$DIV_t - DIV_{max,t} \cdot IDV_t \geq 0 \quad \forall t \quad (17)$$

$$X_t - X_{\max,t} \cdot IDV_t \leq 0 \quad \forall t \quad (18)$$

여기서, $IDV_t : 0, 1$ 정수형 변수로서 상류 축수량이 만족된 경우 값이 1이 됨

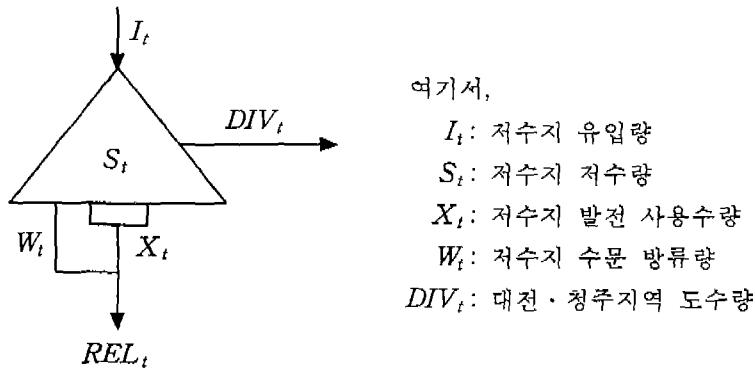


그림 2. 저수지 시스템 정의(대청댐)

또한 Shih 등의 방법과 같이 식(5) 및 식(15)의 UPS_t 및 DEF_t 에 대한 관계설정을 위하여 식(19) 및 식(20)을 추가하였다.

$$UPS_t - B \cdot ISU_t \leq 0 \quad \forall t \quad (19)$$

$$DEF_t + B \cdot ISU_t \leq B \quad \forall t \quad (20)$$

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

식(5)의 비선형항인 $H_t \cdot S_{t-1}$ 은 식(21)을 통한 축차선형계획기법으로 식(22)와 같이 정리하였으며, 이에 따른 제약조건으로 식(23) 및 식(24)를 추가하였다.

$$H_t \cdot S_{t-1} = H_t^* \cdot S_{t-1}^* + S_{t-1}^* \cdot (H_t - H_t^*) + H_t^* \cdot (S_{t-1} - S_{t-1}^*) \quad (21)$$

$$-R_t + (S_{t-1}^* + I_t) \cdot H_t + H_t^* \cdot S_{t-1} - Y_t = H_t^* \cdot S_{t-1}^* \quad (22)$$

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

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

여기서, *는 SLP 반복연산과정에서의 이전 단계 산정결과

4. 적용결과

그림 3은 반복연산에 따른 최대 물부족량(M) 및 연평균 물부족량(AD)의 변동을 나타낸 것이다. 연평균 물부족량은 최대 물부족량에 비해 진동하는 경향을 보이나 전체적인 목적함수의 거동은 안정적인 것으로 판단된다.

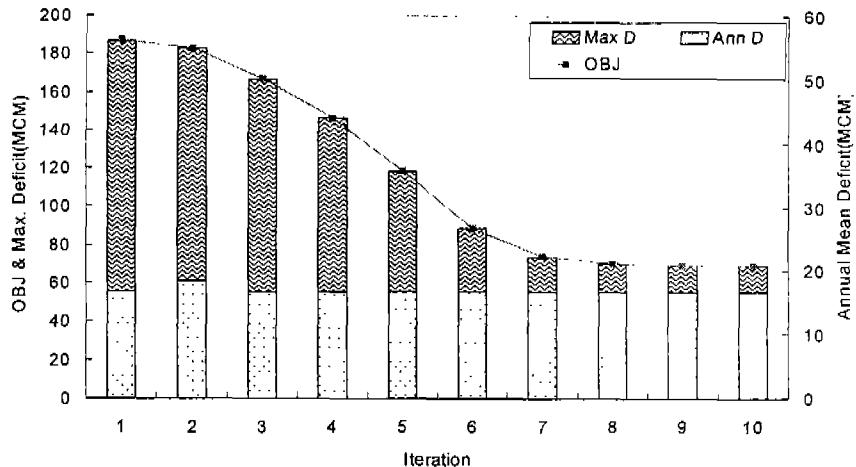


그림 3. 반복연산에 따른 수령상황

표 1은 본 개발모형의 운영결과로서 반복연산에 따른 물부족심도, 연평균 물부족량, 월별 hedging parameter들을 정리하였으며, hedging parameter에 의해 작성된 각 반복횟수별 월별 trigger volume에 상당하는 저수위(Reservoir Water Level)는 표 2에 정리하였다.

표 1. 반복횟수별 hedging parameter 및 위험도 평가기준 변동

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	186.6	16.6	4	3
2	1.20	0.80	0.80	0.88	0.80	1.00	1.00	0.80	0.80	0.80	0.80	0.80	182.8	18.4	4	3
3	1.00	0.65	0.64	0.70	0.64	1.00	1.00	0.64	0.64	0.64	0.96	0.64	166.7	16.6	5	3
4	0.80	0.52	0.51	0.56	0.51	1.00	1.00	0.64	0.51	0.51	0.77	0.61	146.5	16.6	6	3
5	0.64	0.41	0.41	0.45	0.41	1.00	1.00	0.65	0.43	0.41	0.61	0.49	118.8	16.6	7	6
6	0.51	0.33	0.32	0.36	0.32	1.00	1.00	0.52	0.39	0.33	0.49	0.39	88.9	16.6	6	6
7	0.41	0.30	0.30	0.30	0.30	0.95	1.00	0.61	0.37	0.40	0.39	0.31	73.9	16.6	8	8
8	0.32	0.30	0.30	0.30	0.30	0.94	1.00	0.49	0.32	0.32	0.31	0.30	70.6	16.6	9	8
9	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.93	1.00	0.48	0.30	0.30	0.30	0.30	69.3	16.6	10	8
10	0.30	0.30	0.30	0.30	0.30	0.93	1.00	0.42	0.30	0.30	0.30	0.30	69.3	16.6	10	8

5. 결 론

Shih 등(1994)의 hedging rule에 대한 연구내용을 금강수계 대청다목적댐에 대해 적용하기 위하여 정식화 요소중 댐상류의 취수조건 제약식을 추가하였으며 비선형 해석에 대한 수렴성 문제를 해결하기 위하여 본 연구에서는 축차선형계획기법(SLP)를 도입하여 정식화를 시도하였다. SLP 반복연산을 통한 혼합정수계획기법(MIP) 수행으로 hedging parameter를 월별로 산정하였으며, 이를 기준으로 가뭄상황에 대비할 시점을 판단할 수 있는 trigger volume을 산정할 수 있었다.

산정된 hedging parameter를 통한 운영률은 항후 가뭄대책과 연관된 댐 방류계획수립에 적용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 본 개념은 아직 단일 목적댐에 대한 운영률로 제시된 것으로서 수계 연계운영을 전제로한 정식화 연구가 앞으로도 요구된다.

6. 참고문헌

- 최영송, 안경수, 박명기 (2000). "MIP에 의한 댐군연계운영 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
- 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
- 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.