

1 차원 Dynamic Program에 의한 주암댐 계통 최적조작과 5일단위 운영률 개발

권 오현* 유 주환** 김 선배***

1. 서론

주암댐 계통은 주암댐과 이사천댐 및 재조정지로 구성되어 있다. 보성강에 위치한 주암댐은 이사천에 위치한 이사천댐과 병렬 상태이지만 터널로 연결되어 있는 복합형으로서 저수지 조작에 있어서 매우 특이하다.

따라서 주암댐과 이사천댐 조작은 2 차원 문제로 볼 수 있으나 터널 연결과 이사천 발전소 운영을 고려할 때 1 차원 문제로 취급할 수 있다. 본 연구에서는 1 차원 동적계획법으로 계통조작을 최적화하고 이에 따라 저수지 운영률을 개발하였다.

2. 시스템 구성 및 모형화

2.1 시스템 구성

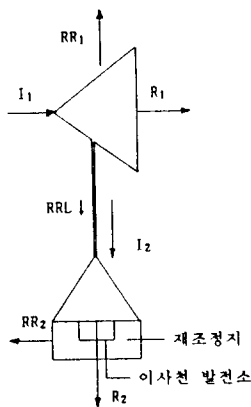


그림 1 주암댐 계통도

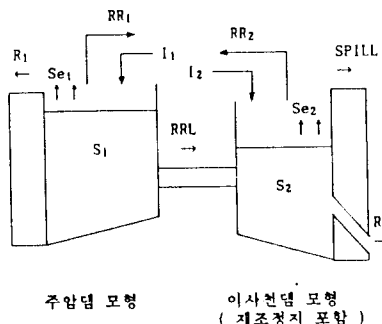


그림 2 저수지 변수 설명

* 충남대학교 토목공학과 교수

** 충남대학교 토목공학과 박사과정

*** 한국수자원공사 연구소 선임연구원

2.2 모형 작성

결정 변수

$R_2(k)$: 이사천담 k 계절 사용수량

상태 변수

$S_1(k)$: 주암담 k 월 초기 저류량

$S_2(k)$: 이사천담 k 월 초기 저류량

$R_1(k)$: 주암담 k 계절 하류 방류량

$RR_2(k)$: 이사천담 k 계절 용수 공급량

$SPILL(k)$: 이사천담 k 계절 여수로 방류량

$RRL(k)$: k 계절 도수터널 유량

시스템 매개 변수

$I_1(k)$: 주암담 k 계절 유입량

$I_2(k)$: 이사천담 k 계절 유입량

$RR_1(k)$: 주암담 k 계절 용수 공급량

$Se_1(k)$: 주암담 k 계절 저수지 손실량

$Se_2(k)$: 이사천담 k 계절 저수지 손실량

目的 函數

$$\begin{aligned} \text{Maximize } (SB) &= \sum \eta \rho g Q_k H_k T_k \\ R_2(k) &= \sum (-\alpha E^1_k + \beta E^2_k) \end{aligned} \quad (1)$$

- 여기서, η : 합성효율
- ρ : 물의 밀도 (1000 kg/m³)
- g : 중력가속도 (9.8 m/s²)
- SB : 시스템 便益으로서 조작물의 함수임
- Q_k : k 계절 동안 발전 사용수량 (m³/s)
- H_k : k 계절 발전낙차로서 저류량 S 의 함수임
- T_k : k 계절 발전시간

E^1_k : k 계절 1 차 전력량

E^2_k : k 계절 2 차 전력량

본 연구에서는 용수공급은 供給需要量을 제약조건으로 반영하였으며 목적함수로 發電便益만을 고려하였다. 1차 및 2차 에너지의 가중치(α, β)를 같게 설정하면 에너지 생산량은 최대화되지만 월별 발전시간의 진폭이 커지는 단점을 갖는다. 본 연구에서는 년도별 계절별로 1 차 발전시간을 변동시키며 α, β 를 1.0 및 0.7 로 적용하였다.

제약 조건

(i) 狀態變數 및 決定變數의 上下限

$$\left. \begin{aligned} S_{i, \dots, i_n} &\leq S_i(k) \leq S_{i, \dots, i_n}(j) \\ R_{i, \dots, i_n}(j) &\leq R_i(k) \\ DR_i(j) &\leq RR_i(k) \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

- 여기서, S_{i, \dots, i_n} : 저수지 最小容量(不用容量)으로서, 時間不變의 變數
- S_{i, \dots, i_n} : 저수지 最大容量으로서 制限水位를 갖는 경우에는 시간함수임
- $R_{i, \dots, i_n}(j)$: 하천 維持用水 등 最小방류 수준
- $DR_i(j)$: 광주권 및 여천지구 등지의 용수수요
- k : 操作기간을 나타내는 계절의 數
- j : k 의 年中 月の 위치(1, 2, ..., 12)
- i : 주암댐($i=1$) 및 이사천댐($i=2$)을 나타냄

(ii) 質量保存의 法則

주암 및 이사천댐의 상태방정식은 2 차원 시스템 방정식으로 표시된다.

$$\begin{aligned} \underline{S}(k+1) &= A \times [\underline{S}(k) + \underline{I}(k) - \underline{Se}(k)] \\ &+ B [\underline{R}(k) + \underline{RR}(k)] + C \times \underline{RRL} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, $A = I_2$ (단위 행렬)

$$B = \begin{bmatrix} -1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} -1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

3. 해법 및 프로그램

다차원 다단계 시스템의 최적화는 Bellman의 最適性의 原理(Principle of Optimality)에 따라 다음의 反復函數(Recursive Equation)로 나타낼 수 있다.

$$f(n) = F [B(n) - C] \quad (4)$$

$$f(n) = \max [f(n-1) + F(n)] \quad (5)$$

여기서, $f(n)$: 1로부터 n 기간까지의 시제열의 최적치
 $f(n-1)$: 1로부터 $(n-1)$ 까지의 시제열 최적치
 $F(n)$: n 구간까지의 함수값
 $B(n)$: n 구간의 편익
 C : 비용

動的 計劃技法은 시스템의 動的特性을 쉽게 나타내주고 있지만 실제로는 컴퓨터의 기억용량의 제한과 연산시간이 방대하므로 增分動的 計劃(Incremental Dynamic Programming)에 의하여 풀게 된다.

본 연구에서 취급한 주암댐 계통 저수지 조작은 5일 단위로 20년간(총 1,460 시간축) 수행되고, 또한 도수터널 수리계산은 24시간 단위(총 7,300 시간축)이므로 앞의 연산법으로는 CPU 시간이 방대하여 분석이 곤란하다.

본 연구에서 연산기간 절감을 위해 개발, 도입된 주요 기법은 다음과 같다.

- i) 初期 増分 : 초기 증분을 큰 값으로 하여, 순환이 반복될 때마다 점차 이를 지수적으로 감소시켜 수렴속도를 증가시킴
- ii) 終期 増分 : 그러나 초기 증분은 상수로 설정하여 수렴치에 도달토록 함
- iii) 累加 貯藏 : 목적함수의 시간 구간별 값을 별도로 저장시키므로써 반복 연산시간을 절감시킴

DP 제어 변수

- 반복계산 회수 : 15~30 회
- 초기 증분
 - 월단위 : 18 MCM / 月
 - 5일 단위 : 4 MCM / 5日

D : 저수지의 취수량 벡터 (2 차원)

실제 운영에 있어서 입력변수의 수가 많으면 의사결정이 어려워지므로 민감도가 낮은 변수를 제외하고 가급적 의사결정이 단순하게 이루어지도록 개발되어야 한다.

본 연구에서는 저수지 조작의 최적화 성과를 다각도로 분석하고, 아울러 사용자의 의사결정이 가급적 단순하도록 그림 5 와 같은 흐름을 선택하였다. 여기서 주암댐 유입량과 터널 도수량은 계절 j 와 수위차 Δh 로 반영되었으며, 양 저수지의 수위차 Δh 는 j 계절 초기의 값이므로 j 계절동안 Δh 의 변동은 계절의 함수로 반영시키려는 의도이다.

입력 변수의 민감도 분석은 계산의 번잡성때문에 통계 기법을 쓰지 않고 圖解法에 의하였다. 20년간 최적운영 자취분석 결과는 그림 3 과 그림 4 와 같다.

그림 5에서 계절 j 초기 입력치인 유입량 I 는 미지수이므로 j 계절의 평균유입량을 쓰거나, 또는 회귀모형이나 ARIMA 모형에 의한 예측유량을 추정해야 한다. 이때 기상예보 자료나 현지 판단에 따라 입력정보를 조정하고, 유입량을 기간중에 검토, 보정하는 것이 바람직하다. 본 연구에서는 평균유입량, 과거 20년 유량 패턴 중 근접된 유량 또는 초과 확률별 유량 등 3 종류의 유량 중 선택토록 하였다.

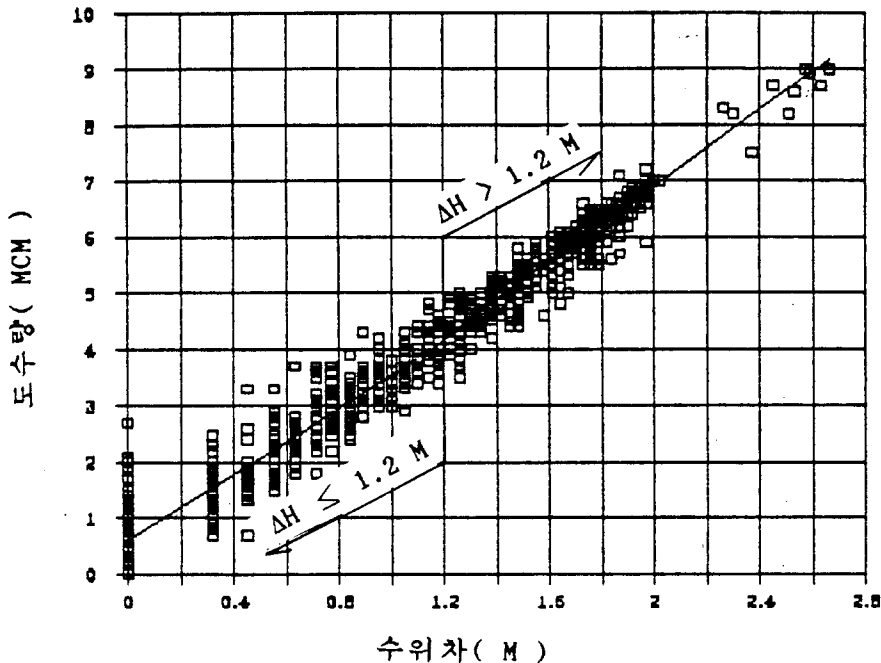


그림 3 초기 수위차 對 도수량

그림 5의 운영틀은 의사결정 지원 체제(DSS)의 기본 요소로서 그 입출력 자료를 정리하면 다음과 같다.

- (i) 기본 입력 자료 : ● 年 月 日 ● 양 저수지 수위 ● (j-1)계절의 유입량
- (ii) 선택 입력 자료 : ● 前期間까지의 유입량에 입각하여 예측될 수 있는 當期間 유입량 선택, 또는 平均 유입량
● 사용 수량 중 기상 특성에 따른 현지 선택, R 또는 (R ± ΔR)
- (iii) 출력 자료 : 의사 결정 자료로서 다음을 제시함
● 당기간 중 사용수량
● 당기간 중 1일 발전 시간
● 당해년도 예상 발전량

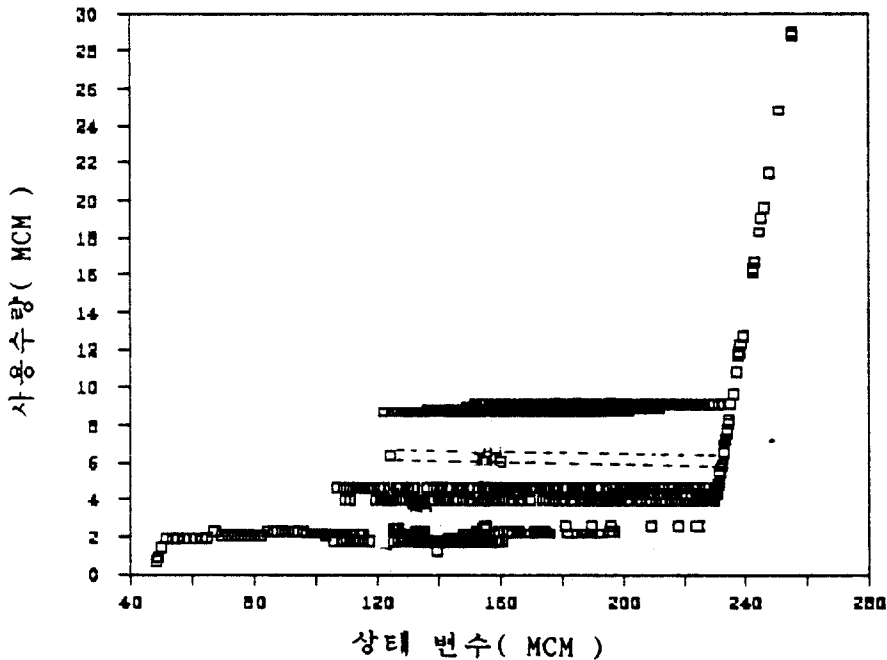


그림 4 상태 변수 對 최적 사용수량

5. 5日 運營律의 效果檢證

앞에서 기술한 저수지 운영틀의 實用性을 검증하기 위하여, 이에 따라 模擬操作을 실시하여 最

適化 발전량과 대비하였다.

일반적으로 모형의 개발과 그 검증에 쓰이는 자료는 각각 달라야 한다. 그러나 본 연구에서는 20 년간 자료를 같이 적용하였다. 이는 자료가 부족한 까닭도 있지만, 저수지 조작이란 變數의 時系列性에 큰 의미를 갖고 있는데, 5일 운영틀은 1 년 73 계절 단위로 구성되어 20년의 시계열 성과는 독립적이기 때문이다. 다시 말하면 5일 운영틀은 20 년간 자료의 발생순서에 관계 없이 적용되므로 큰 문제가 되지 않는다고 판단하였다.

저수지 운영틀을 실제로 적용함에 있어서, 주요 변수인 터널 導水量, 사용 수량 등은 기상조건 등으로 판단하여 현장에서 다소의 증감이 있을 수 있으나, 이 검증 절차에서는 평균치를 적용하였다.

저수지 운영틀과 최적화에 의한 운영을 비교하면 표 2와 같으며, 최적치의 95 % 정도 육박하였다.

기준년도	연간 에너지 (10 ⁶ KWH)		
	최적화 (A)	운영틀 (B)	대비 (B/A)
1994	77.65	75.52	0.97
2001	72.86	68.30	0.94

- 1) 냉해계약, 보성강 확장조건
- 2) 유량자료 1970~1989

6. 결 론

- 1). 주암-이사천댐 계통은 2 차원의 저수지계임에도 불구하고 계통의 최적화 모형은 1 개의 이사천댐 사용수량을 결정변수로 하여 1차원 동적 계획에 의하여 풀 수 있다.
- 2). CPU 연산 시간을 절약하기 위하여 그동안 충남대학교에서 개발, 사용한 축차 중분동적기법을 수정, 사용하였다.
- 3). 5일 단위 운영 결과의 효과검증 결과 최적화 운영 결과의 95 % 수준의 전력량을 생산할 수 있었다.
- 4). 실제운영에 있어서 경험 축적과 氣象豫報資料를 활용하면, 보다 나은 성과를 기대할 수 있을 것이다.