

## 2次元 動的計劃技法에 의한 住岩댐 系統의 月單位 最適 操作과 運營率 開發

Monthly Based Optimization Operating and Operating Rule for Juam System  
Using Two Dimensional Dynamic Programming

高錫九\* 權五憲\*\* 金善培\*\*\* 李光晚\*\*\*\*

### 1. 序 論

저수지 운영의 시스템 분석을 위해서는 우선 수계내에 존재하는 저수지의 연결상태와 유입량 이라든가 방류량, 도수량 등에 대한 시스템 구성 제인자들에 대한 이해가 최 우선적으로 이루어져야 하며, 특히 다차원의 저수지 운영 문제에 있어서는 각종 운영상태 및 조건들을 사전에 충분히 검토하여야 한다. 다목적 저수지 운영에 있어 시스템 분석 기법의 적용은 궁극적으로 수학적 모형을 개발하는데 있으며, 개발된 모형이 제공하는 해의 적절한 분석을 통하여 시스템으로부터의 편익을 극대화할 수 있는 기준이나 운영율 (operating rule)을 개발하여야 한다.

저수지 운영 정책을 정하는 방법중 다차원의 저수지 운영 문제에서는 Implicit Approach를 이용하면 수문 조건을 직접 모형에 반영하는 Explicit Approach 기법보다 쉽게 좋은 결과를 얻을 수 있는데 이와 같은 방법은 추계학적 수문량을 결정론적인 방법으로 해석하여 그의 결과를 이용하게 되며, 저수지 운영관련 인자들 간의 상관성을 도출하여 운영 방안을 결정하게 된다.

즉, 저수지의 운영율을 과거의 결정론적 성과를 이용하여 시계열로 분석하여 상태변수 및 결정변수의 상관관계를 구하는 것으로 특히, 2차원 이상의 연계운영 문제에서의 저수지 운영율의 개발은 많은 수의 상관 인자로 인하여 단일 저수지와 같은 명확한 상관성을 갖는 운영 방안을 도출한다는 것은 쉽지 않다.

본 연구에서는 각 취수 지점에서의 용수수요의 충족은 물론 갈수량 증대, 하천유지 용수의 확

\* 정희원, 한국수자원공사 수자원연구실 책임연구원, 공학박사

\*\* 정희원, 충남대학교 공과대학 토목공학과 교수, 공학박사

\*\*\* 한국수자원공사 수자원연구실 선임연구원

\*\*\*\* 정희원, 한국수자원공사 수자원연구실 연구원, 중앙대 박사과정

보, 수력에너지 생산의 극대화 등 복잡하고 다양한 이수 증대 목적을 갖고 있는 섬진강 수계내 수자원 시스템중 주암댐을 본댐으로 하고 조정지댐의 역할을 하는 도수터널로 연결된 이사천댐을 대상으로 최적 2차원 연계 운영 모형을 개발하여 월 단위의 장기 운영 결과 및 5일, 10일 단위의 단기 운영 결과를 분석하여 시스템의 편익을 평가하며, 조정지댐인 이사천댐의 방류량을 결정변수로 하는 월단위 선형 저수지 운영을 개발하여 최적 저수지 운영 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 시스템 構成 및 模型化

주암 다목적댐 건설사업은 정부의 4대강 유역 종합 개발 계획의 일환으로 '84. 9월 공사의 착공을 시작으로 '91. 5월 준공되었다. 주암댐 계통은 우리나라 남부지방의 부존 수자원을 적극 개발하고 효율적으로 이용하기 위하여 광주시 동남방 30 Km 지점에 있는 섬진강 지류인 보성강에 유역면적 1,010 Km<sup>2</sup>, 높이 57 m, 길이 330 m 사력댐인 본댐과 순천시 서쪽 5 Km 지점에 있는 이사천에 유역면적 134.6 Km<sup>2</sup>, 높이 106 m, 길이 575.4 m 사력댐인 이사천댐과 조정지댐 하류에 높이 18m, 길이 115m 사력댐 및 콘크리트 중력식댐의 복합형인 역조정지댐으로 구성되어 있으며, 본댐과 조절지댐은 도수터널로 연결하고 조절지댐 직하류에 시설용량 22,500 KW의 수력발전소를 건설하여 년평균 51.3 GWH (최대 73.2 GWH 최소 45.3 GWH)의 수력에너지를 개발하여 본댐에서는 광주시의 생활용수를 비롯한 용수 740,000 m<sup>3</sup>/day 를 공급하고 이사천댐에서는 여천 및 광양지구 생·공용수를 비롯한 용수 691,000 m<sup>3</sup>/day를 공급, 연간 총 498,680,000 m<sup>3</sup>의 용수를 공급하게 되며 본댐과 조절지댐을 합하여 80,000,000 m<sup>3</sup>의 홍수조절을 목적으로 건설되었다.

모형에서 최적화의 기준이 되는 목적함수는 용수 공급 및 발전 에너지에 의한 시스템의 편익 극대화를 평가기준으로 하되, 용수공급은 공급 수요량을 제약조건으로 반영하고 최적화 변수로는 발전 편익만을 고려하였다. 또한 이사천댐 하류의 냉해방지도 제약조건으로 고려하였다. 다차원 시스템의 최적화는 Bellman (1957)의 최적화 원리에 입각한 증분 동적 계획 기법 (IDP)을 이용하였다.

모형의 적용에 있어 1953-1982 (30년) 및 1983-1989 (7년)의 월유량 자료를 구분하여 사용하였으며, 본 모형에서 여러 목적을 동시에 고려할 수 있는 다목적 분석기법중 가장 보편적으로 사용되고 있는 Weighting 기법 (Zadeh, 1963)을 이용하여 광주 및 여천, 광양지구로의 용수공급 등 각종 용수수요를 충족시키면서 전력량을 극대화하는 것으로 구성하였다.

### Objective Function

$$F = w_1 F_1 + w_2 F_2 + w_3 F_3 \dots \dots \dots (1)$$

$$F_1 = \max \sum_{t=1}^T f_1(X_{2t}, X_{2t+1}, u_{2t}) \dots\dots\dots (2)$$

$$F_2 = \max \sum_{t=1}^T [ - (S_{1t})^2 ] \dots\dots\dots (3)$$

$$S_{1t} = T_{1t} - (u_{1t} + D_{1t})$$

$$S_{1t} = 0.0 \quad \text{for} \quad S_{1t} \leq 0.0$$

$$S_{2t} = T_{2t} - (u_{2t} + D_{2t})$$

$$S_{2t} = 0.0 \quad \text{for} \quad S_{2t} \leq 0.0$$

$$F_3 = \max \sum_{t=1}^T [ - (S_{2t})^2 ] \dots\dots\dots (4)$$

Subject To :

$$U_{1t} = X_{1t} - X_{1t+1} + I_{1t} - E_{1t} (X_{1t}, X_{1t+1}) - D_{1t} - R_t \dots\dots\dots (5)$$

$$U_{2t} = X_{2t} - X_{2t+1} + I_{2t} - E_{2t} (X_{2t}, X_{2t+1}) - D_{2t} - R_t \dots\dots\dots (6)$$

$$X_{1t, \min} \leq X_{1t} \leq X_{1t, \max} \dots\dots\dots (7)$$

$$X_{2t, \min} \leq X_{2t} \leq X_{2t, \max} \dots\dots\dots (8)$$

$$u_{1t, \min} \leq u_{1t} \leq u_{1t, \max} \dots\dots\dots (9)$$

$$u_{2t, \min} \leq u_{2t} \leq u_{2t, \max} \dots\dots\dots (10)$$

여기서,  $X_t$ 는 저수지의 저류량이고  $I_t$ 는 자기 유입량이며,  $E_t$ 는 저수지 증발량,  $U_t$ 는 저수지 방류량,  $D_t$ 는 댐 상류에서의 물사용 손실량,  $R_t$ 는 도수터널에 의한 유수 전환량을 나타낸다. 또한 목적함수 중  $w$ 는 각 목적에 대한 가중치이며,  $f$ 는 발전량을 산출하는 함수식이고,  $S_t$ 는 용수공급 부족량을,  $T_t$ 는 용수공급 목표량을 각각 나타내며, Subscript 중 1은 주암 본댐을, 2는 이사천 조절지댐을 나타낸다.

위의 모형의 문제 구성은 주암 본댐의 경우는 댐으로부터 용수를 공급하고 잔여 유량을 도수터널을 통하여 이사천 저수지에 유수 전환하며, 이사천댐에서는 이사천댐 본류 유입량과 주암 본댐으로부터 유수전환된 물을 이용하여 용수를 충족시키면서 발전편익을 최대화 하는 문제이다. 따라서 개발된 모형에서는 용수공급 및 발전 시설의 특성을 고려하면서 이사천댐에서의 방류량을 결정

하는 문제로 볼 수 있어 CSUDP (Labadie, 1989) 2차원 동적 계획 기법으로 분석하였다.

### 3. 最適 運營 및 分析

#### 3.1 月單位 最適 運營

섬진강 수계내 3개 댐을 Rule Curve나 운영관례에 맞도록 모의조작을 하여 주압댐 계통의 조작조건을 성립시키고 보성강댐 수력증설 및 이사천댐 발전 방류수에 의한 하류 냉해가 주압 및 이사천댐의 저수지 운영에 미치는 영향을 검토하기 위하여 2 차원 동적 계획 기법에 의한 저수지 시스템운영 모형분석을 시행하였으며, 이에 따른 모델링은 보성강댐 수력증설 전, 후 및 이에 따른 냉해 영향을 동시에 검토하였으며, 분석기간은 1953-1982간의 30년간 (건설부/삼안건설기술공사, 1984)의 월 유량 자료와 금번에 산정된 1983~1989의 7년간의 2 개 부분으로 구분하여 그 영향을 분석하였으며 그 결과는 다음의 표-2 및 3과 같으며, 이사천댐 하류 농업용수의 냉해를 방지하기 위한 관개기인 5월에서부터 9월까지 5개월을 제약기간으로한 최대 하류제약 방류량은 표-1로 운영하였다.

Table-1 이사천댐 냉해방지를 위한 최대 하류 제약 방류량

구 분	5 월	6 월	7 월	8 월	9 월	Remaks
최대방류량(CMS)	5	6	6	5	5	
(MCM)	13,392	15,552	16,070	13,392	12,960	
최저수온 (°C)	14	18	19	20	20	

기타 비 관개비 : 10월 - 4월 : 100 MCM/Mon

위의 조건을 고려한 월별 최적운영의 결과를 살펴보면 한전의 보성강 수력 발전시설 증설 전후의 운영 결과는 주압댐에서 광주권으로의 용수수요 증가등을 고려하고 댐의 경제수명을 50년으로 한 주압댐에서 이사천댐으로의 도수량은 증설전에 비해 증설후 6.6% 정도의 감소를 보이고 있으며, 연간 발전량은 4.2%, 용수공급 부족량은 2001년부터 부족현상을 보이고 있으며, 보성강댐 수력 증설후 냉해 방지를 고려한 경우는 터널도수량은 18%, 연간 발전량은 11% 정도 감소를 보이고 있다.

#### 3.2 短期 (5日, 10日 單位) 最適 運營

Table-2 한전 보성강댐 수력증설 영향 검토

구 분	1952 - 1982			1983 - 1989		
	증설전	증설후	증감	증설전	증설후	증감
터널도수량 ( MCM )						
1991	478.8	453.3	-25.5	551.4	535.6	-15.8
1994	444.6	416.4	-28.2	519.4	501.6	-17.8
1996	419.5	395.3	-24.2	505.4	494.4	-11.0
2001	378.1	356.6	-21.5	464.6	447.0	-11.0
2010	304.9	283.4	-21.5	394.1	380.9	-13.2
50년 평균	337.1	314.9	-22.2	430.0	410.3	-19.7
년간발전량 ( GWH )						
1991	98.3	94.9	-3.4	113.5	111.3	-2.2
1994	92.9	89.1	-3.8	109.0	106.3	-2.7
1996	89.3	85.9	-3.4	106.4	104.5	-1.9
2001	82.4	79.4	-3.0	99.9	97.4	-2.5
2010	71.2	68.0	-3.2	89.4	87.3	-2.1
50년 평균	76.2	73.0	-3.2	94.0	91.8	-2.2
1992 기준						
10 %	1026.8	986.8	-40.0	1230.1	1202.8	-27.3
8 %	1151.9	1109.1	-42.8	1443.1	1410.8	-32.3
용수공급 부족량 ( MCM )						
1991	-	-	-	-	-	-
1994	-	0.4	0.4	-	-	-
1996	1.0	3.4	2.4	-	-	-
2001	7.4	13.5	6.1	-	-	-
2010	25.6	34.1	8.5	1.8	5.5	3.7
50년 평균	19.0	26.0	7.0	1.1	3.4	2.3

주암 및 이사천댐 계통에 대하여 단기 최적 운영을 검토하기 위하여 유입량 자료는 1953에서 부터 1955년까지 3년간의 자료를 이용하였으며, 용수수요 수준은 1996년 수준으로 실시하였으며, 운영 결과는 표-4와 같다.

4. 月單位 線型 決定率

저수지 운영율의 하나인 Rule Curve는 과거의 유입량 자료와 수력발전 및 용수공급 등 저수지

Table-3 냉해제약에 따른 영향 평가

구 분	1952 - 1982			1983 - 1989		
	냉해 불고려	냉해 고려	증감	냉해 불고려	냉해 고려	증감
<b>터널도수량 ( MCM )</b>						
1991	453.3	355.3	-9.8	535.6	356.1	-179.5
1994	416.4	313.3	-103.1	501.6	310.7	-190.9
1996	395.3	321.5	-73.8	494.4	296.1	-198.3
2001	356.6	297.2	-59.4	447.0	305.0	-142.0
2010	283.4	232.4	-51.0	380.9	247.4	-133.5
50년 평균	314.9	256.7	-58.2	410.3	266.4	-143.9
<b>년간발전량 ( GWH )</b>						
1991	94.9	80.1	-14.8	111.3	86.5	-24.8
1994	89.1	74.9	-14.2	106.3	80.4	-25.9
1996	85.9	75.1	-10.8	104.5	78.0	-26.5
2001	79.4	71.1	-8.3	97.4	78.1	-19.3
2010	68.0	61.0	-7.0	87.3	69.2	-18.1
50년 평균	73.0	64.9	-8.1	91.8	72.3	-19.5
1992 기준						
10 %	986.8	859.4	-127.4	1202.8	933.3	-269.5
8 %	1151.9	1006.8	-145.1	1410.8	1097.5	-313.3
<b>용수공급 부족량 ( MCM )</b>						
1991	-	-	-	-	-	-
1994	0.4	1.2	0.8	-	-	-
1996	3.4	3.5	0.1	-	-	-
2001	13.5	12.7	-0.8	-	-	-
2010	34.1	33.7	-0.4	5.5	11.3	5.8
50년 평균	26.0	25.7	-0.3	3.4	7.0	3.6

에 주어진 다목적 기능을 감안하여 확정론적 최적화 성과를 시계열로 분석하여 도출해 낼 수 있다 (李熙昇 등, 1992). 특히 연계운영 시스템의 Rule Curve 개발은 관련인자들 간의 상관성을 도출하는데 많은 시간과 노력이 필요하며, 단일 저수지의 Rule Curve와 같은 명확한 상관성을 도출하기는 어렵다. 특히 두댐은 도수터널로 연결되어 있으며, 용수공급 및 발전이 주로 이사천댐을 중심으로 이루어지고 있다. 이러한 점을 염두에 두고 주암 및 이사천 연계운영을 위한 Rule Curve를 도출하였는데 성과는 충분히 만족스러운 결과를 보여주고 있다.

저수지 상태 인자들간의 상관성을 도출하는 데는 많은 수의 자료가 필요하나 주암 및 이사천

Table-4 Optimization Result for Various Intervals

Items	10-Days Interval	5-Days Interval	Monthly Interval	Remarks
· 주암본댐 (년평균)				
년간유입량	717.3	717.3	717.3	
댐상류 도수량	239.3	239.3	239.3	
댐하류 방류량	81.0	95.3	72.0	
터널 도수량	388.3	374.0	397.3	
용수공급 부족량	0.06	0.43	0.05	
90% 보장용수공급	3.03	2.88	3.01	
· 이사천댐 (년평균)				
년간유입량	126.7	126.7	126.7	
발전방류량	511.7	497.3	521.3	
비발전방류량	1.0	0.7	0.1	
년간발전량	81.1	79.7	82.9	
년평균발전시간	10.84	10.58	10.8	
평균출력	21.63	21.59	21.54	
용수공급부족량	0.0	0.57	0.0	
90% 보장에너지	3.18	2.76	3.04	
90% 보장용수공급	18.21	16.02	18.56	

댐 연계 최적 운영에 사용할 수 있는 과거기록 유입량 자료는 37년간의 자료에 국한되어 있어 한강 수계에 적용하여 사용성이 입증된 MPAR 1 (multi-variate periodic autoregressive lag-1) 모형 (Ko, 1989)을 이용하여 150 년치의 유하량 자료를 모의 발생시켜 Implicit Approach 방법으로 운영을 개발하였다.

일반적으로 운영을 저류법칙과 방류법칙으로 대별할 수 있는데 본 연구에서는 방류법칙으로 개발하였다. 방류량을 결정하기 위한 상태변수들을 다음식을 기초로 하여 15가지의 조합을 구성하여 상관성을 분석하였으며, 그중 가장 우수하다고 판단되는 결과는 표-5와 같다.

$$U_{2,t} = f(X_{1,t}, X_{2,t}, I_{1,t}, I_{2,t}) \quad t \in t=1, \dots, 12 \quad \dots \dots \dots (11)$$

여기서,  $t$ 는 시계열 분석기간의 한 요소이거나 전체 분석 기간중의 몇개의 조합된 요소이며, 저수지에서  $t$ 월 동안의 월간방류량  $U_{2,t}$ 는 주암 및 이사천댐의 저류량  $X_{1,t}$  및  $X_{2,t}$ 와 상관성이 있거나 저류량  $X_{1,t}$ ,  $X_{2,t}$  및 유입량  $I_{1,t}$ ,  $I_{2,t}$ 와 함께 상관성이 있는 것으로 보고 분석하였다.

이의 결과를 살펴보면 9월과 10월은 주암 및 이사천댐의 월초 저류량 및 유입량과의 상관성이 가장 우수했으며, 그외의 달은 주암댐의 월초저류량과 전월초 저류량, 주암 및 이사천댐 유입량과 상관성이 우수한 결과를 보였다.

$$U_{2,t} = a_t \times V_t + b_t \dots\dots\dots (12)$$

(9, 10월)  $V_t = X_1(t) + X_2(t) + I_1(t) + I_2(t)$

(9, 10월 외)  $V_t = X_1(t) + X_2(t-1) + I_1(t) + I_2(t)$

위와 같이 개발된 운영율은 1994년도 용수수요를 고려하여 이사천댐 발전 방류수의 냉해 제약을 고려한 것으로서 이러한 조건하에서만 사용하여야 하며, 상황변화에 따라서는 별도의 연구가 이루어져야 할 것이다.

Table-5 주압 및 이사천댐 연계운영 Rule Curve

Mon	Storage (MCM)	Rule Curve		Mon	Storage (MCM)	Rule Curve	
		a <sub>t</sub>	b <sub>t</sub>			a <sub>t</sub>	b <sub>t</sub>
1月	V <sub>t</sub>	-0.04862	66.72198	7月	V <sub>t</sub> < 1010   1010 ≤ V <sub>t</sub>	-0.002530   0.300394	27.05970   -280.92300
2月	V <sub>t</sub>	-0.08301	83.76809	8月	V <sub>t</sub> < 950   950 ≤ V <sub>t</sub>	0.003702   0.252196	20.20685   -225.08800
3月	V <sub>t</sub>	-0.12173	107.04990	9月	V <sub>t</sub> < 750   750 ≤ V <sub>t</sub>	0.014798   0.081631	10.77492   -39.82730
4月	V <sub>t</sub>	-0.06587	79.01560	10月	V <sub>t</sub> < 550   550 ≤ V <sub>t</sub>	0.003013   0.172450	+18.17048   -70.80010
5月	V <sub>t</sub>	-0.00426	22.90163	11月	V <sub>t</sub> < 650   650 ≤ V <sub>t</sub>	0.039731   0.079827	-2.28750   -29.32310
6月	V <sub>t</sub>	-0.01159	29.66908	12月	V <sub>t</sub> < 600   600 ≤ V <sub>t</sub>	0.019383   -0.094530	14.67499   105.89030

개발된 운영율은 유입량의 조건에 따라 저수지의 수위변동이 불가피하나 저수지 수위가 어느 한계 이하로 내려가지 않는 한 저수지의 기능을 유지하기 위해서는 저수지의 저류상태나 유입량의 조건에 따라 신뢰도 수준을 고려하여 일정한 기준에 따라 방류량을 결정할 수 있다. 개발된 운영율은 1월부터 6월까지의 상태조건 변화에 관계없이 일정량 방류 형태로 저수지를 운영할 수 있으나 7월부터 12월 사이는 방류의 증감이 변곡점을 기준으로 하여 변하고 있어 Feed Back 하면서 조정하여야 한다.

5. 結論 및 考察



본 연구에서는 2차원 동적계획 기법으로 주암 및 이사천댐을 장·단기의 연계 운영할 수 있도록 범용성을 갖는 최적화 모형을 개발하였고 이사천댐에서의 방류법칙에 의한 저수지 운영 Rule Curve를 개발하였다. 이러한 저수지 운영율은 저수지 운영계획 수립에 이용할 수 있으며, 시스템으로 부터 기대편익의 증대를 기할수 있을 것이다.

본 연구성과를 저수지 운영에 실제로 활용하기 위해서 저수지의 월간 방류량 결정을 위한 월별 운영율은 1994년도 용수수요를 고려하여 이사천댐 발전 방류수의 냉해 제약을 고려한 것이므로 이러한 조건에서만 사용되어야 하며, 조건의 변화에 따른 운영법칙은 추후 개발되어야 한다.

### 參 考 文 獻

Bellman, R., Dynamic Programming, Princeton University Press, Princeton, NJ, 1957.

Ko, S. K., "Optimization Reservoir Systems Operation with Multiobjective Decision Analysis," Dissertation Submitted for the Degree of Ph. D., Colorado State University, Fort Collins, Co., 1989.

Labadie, J. W., "Dynamic Programming with the Microcomputer : Program CSUDP," Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, Co., 1989.

Zadeh, L. A., "Optimality and Non-Scalar-Valued Performance Criteria," IEEE Transactions on Automatic Control, AC-8, No.1, pp.59-60, 1963.

이회승, 심순보, 고석구, "신뢰도를 고려한 다목적 저수지의 월별 운영율", 한국수문학회 논문집, 제25권 제1호, 1992.

건설부/삼안기술공사, 주암다목적댐 실시 설계 기본 설계 보고서, 1984.