

動的計劃技法을 利用한 華川댐의 用水供給能力 增大에 關한 研究

A Study on the Potential Water Supply of the Hwachon Dam Using Dynamic Programming

°金 和洙*, 李 熙榮**, 高 錫九***

1. 서 론

대규모댐을 대상으로한 수자원 시스템 문제해석을 위해 많이 이용되는 의사결정방법으로는 크게 모의기법과 최적화기법을 들 수 있다. 모의기법의 경우 시스템 체계에 대한 기대 반응의 대안들을 의사결정권자의 직관과 경험을 바탕으로 결정하게 되나, 최적화기법의 경우는 자체적으로 생성된 매우 많은 대안들 중에서 의사결정권자가 평가하고자 하는 내용을 가장 잘 달성할 수 있는 최적해를 제공하게 된다. 대부분의 수자원 시스템 문제의 해를 구하기 위한 방법으로는 위의 두 가지 방법을 문제의 성격에 맞게 적절히 이용하는 것이라 할 수 있으며, 대안이 많고 시스템 체계가 복잡하며, 기대편익의 최대화 및 시설물의 최적관리 방안을 추구하는 입장에서는 최적화기법이 유리하다.

특히 화천댐과 같이 기존의 운영목적이 발전에너지 생산을 주목적으로 운영되는 시스템 체계에서 하절기 홍수조절용량을 고려하여야 하고, 댐에서 이루어지는 방류가 하류지역의 용수공급에 중요한 영향을 미치는 경우 이들 세가지 모두를 평가함수에 고려하는 다목적 분석기법의 적용이 필요하다. 이와같은 점을 고려한 시스템 운영 개선방법으로는 저수지 운영규정으로 주어진 하절기 홍수조절을 위한 제한수위를 유지하면서 하류 용수보장 증대를 위하여 하한 방류량을 제약하고 발전량 최대화를 추구하는 개념의 운영계획 수립도 기대편익 향상에 도움을 줄 수 있다.

본 연구에서는 이와같은 개념을 바탕으로 현재 발전에너지 생산과 하절기 홍수조절만을 고려하여 운영되고 있는 화천댐을 대상으로 이러한 목적외에 용수공급 능력증대를 위한 방류 하한 제약조건을 과거 운영실적으로부터 월별 초과확률별로 선정하여 동적계획기법에 의거 최적운영 결과를 분석하고 발전에너지 생산 최대화를 위한 운영방안을 제시하고자 한다.

2. 동적계획기법에 의한 화천댐 최적운영

화천댐은 현재의 운영목적이 발전 단일목적으로 운영되고 있으나 방류형태에 따라 하류지역의 유황에 영향을 주며, 다시 유황은 용수공급능력에 상당한 영향을 미치고 있어 댐의 다목적 효과를 고려한 저수지 운영방안이 검토되어야 한다. 이의 분석을 위해서는 다목적 분석기법을 적용해야하나 문제의 복잡성 및 평가함수 구성요소의 이질적인 특성등으로 주로 1개의 목적만을 고려하는 단일 목적함수만을 사용할 수 있다.

여러가지 목적함수를 동시에 고려하는 다목적 분석기법으로써 Haimes 등(1971)이 제시한 ϵ -constraint 기법에 있어서는 1개의 목적 함수만을 남겨 놓고 다른 함수는 제약조건으로 변환하되 변환된 목적함수의 값을 상한선에서 하한선, 또는 하한선에서 상한선으로 증분하면서 여러

- * 한국수자원공사 조사계획처, 수자원계획부장
- ** 서울시립대학교 토목공학과 교수, 공학박사
- *** 한국수자원공사 조사계획처장, 공학박사

가지의 대안에 대한 최적화 문제를 풀어서 의사결정을 위한 시스템 기술자의 입장에서 최적의 안을 선택할 수 있도록 하는 방법이 가능하다. 이와같은 방법으로는 댐운영목적과 관계된 중요도를 발전에너지 생산에 맞추는 방법 (대안 I)과 발전 및 용수공급 보장량 증대를 위한 Max(Min) 방법 (대안 II, III), 용수공급 측면에서 댐에서의 보장방류량 증대를 위하여 방류량 하한조건을 제약하는 ϵ -constraint 기법 (대안 IV)을 적용하고자 한다. 따라서, 화천댐의 발전에너지 생산 단일목적 운영방안에 하류의 보장량 증대를 위한 이수목적을 월별 방류량 제약조건으로 적용하기 위한 평가함수는 보통 다음과 같이 구성 할 수 있다.

$$F_1 = \max \sum_{t=1}^N f_t(X_t, U_t) \dots\dots\dots(1)$$

$$F_2 = \min(\max) \text{ or } \max(\min) \{f_1(X_1, U_1), f_2(X_2, U_2), \dots, f_N(X_N, U_N)\} \dots\dots(2)$$

for $t = 1, \dots, N$

여기서, F_1 은 댐의 수력발전소로부터 운영기간중 발생하게 되는 발전에너지의 최대화, 혹은 용수공급량의 최대화, F_2 는 댐의 수력발전소로부터 운영기간 중 발생하게 되는 보장 발전량의 최대화, 혹은 수계내 댐하류 용수공급을 위하여 운영기간중 방류되는 보장유량의 최대화, 홍수피해의 최소화를 평가하기 위한 목적함수로 이용될 수 있다. $f_t(\cdot)$ 는 저류량과 방류된 물의 양에 따라 결정되는 발전량을 나타내는 함수, t 는 저수지 운영기간, X_t 는 저수지 운영기간 t 에서의 초기 저류량, U_t 는 저수지 운영기간 t 동안의 방류량, N 는 저수지 운영단계를 나타낸다.

화천댐 저수지 시스템의 최적운영모형에서 고려하여야 할 제약조건으로는 물 수급균형을 나타내는 시스템 상태방정식과 목적함수 및 상태방정식에 포함된 각변수의 상한 또는 하한값을 나타내는 사항들이 고려의 대상이다. 시스템 상태방정식은 저수지 시스템으로 들어오고 나가는 물의 상태를 나타낸다. 시스템에서 나가는 물로서는 발전방류나 여수로 방류량과 용수공급등을 위한 도수나 유수전환량, 저수지 수면으로부터의 증발량 및 수면하의 침투량등이 있다. 이러한 사항을 질량보존의 법칙에 입각하여 다음과 같이 수식화할 수 있다.

$$\underline{X}_{t+1} = \underline{X}_t + \underline{I}_t - \underline{U}_t - E_t(\underline{X}_t, \underline{X}_{t+1}) - \underline{D}_t \dots\dots\dots(3)$$

for $t=1, \dots, T$

$$\underline{X}_t \min \leq \underline{X}_t \leq \underline{X}_t \max \dots\dots\dots(4)$$

$$\underline{U}_t \min \leq \underline{U}_t \leq \underline{U}_t \max \dots\dots\dots(5)$$

여기서, 식 (3)에서 (5)까지 이용된 변수중 \underline{X}_t 는 기간 t 의 월초 저류량을 나타내는 Vector, \underline{X}_{t+1} 는 기간 t 에서의 말기 저류량, \underline{I}_t 는 기간 t 동안에 저수지로 유입하는 자연유입량, \underline{D}_t 는 기간 t 동안에 저수지 상류에서의 물 소모량 또는 유수 전환량, E_t 는 기간 t 동안에 저수지로부터의 수면증발 손실량과 저수지 수면 강우량을 감안한 손실량, \underline{U}_t 는 기간 t 동안에 댐에서의 방류량이다.

이때 식(5)의 방류량 하한 제약조건은 보장발전량이 있는 경우 이를 방류량으로 환산하여 적용하며, 보장 용수공급량과 비교하여 큰값을 설정하는 것이 보통이다. 그러나 현재의 화천댐 운영과 같이 보장발전 및 용수공급이 확정되어 있지 않은 조건에서 용수공급 능력증대를 위한 하천유황 개선을 위해서는 하한 방류기준을 적절히 설정하여야 한다. 이를 결정하기 위한 방법중의 하나로서 과거방류량 실적자료를 이용하여 월별 초과확률별로 정리하여 제약조건으로 적용하고 이때 발생하는 발전편익과의 Tradeoff 분석을 이용하면, 발전편익을 확보하면서 용수공급 보장량 증대에 효과적일 수 있다. 이를 초과확률조건을 고려하여 재 정리하면 다음식과 같다.

$$U_t \min \geq W_t \cdot P(1-\alpha_t) \dots\dots\dots(6)$$

여기서, α_t 는 t 월의 방류량 초과확률, W_t 는 t 월의 초과확률에 대응하는 방류량이다.

3. 화천댐의 개요

3.1 운영개요

화천댐은 서울로부터 162 km 지점에 위치하며, 유역면적은 4,092 km², 년평균 유입량은 3,138 MCM (1966-1992)에 달하며, 댐높이 81.5 m, 길이 435 m, 만수면적 36.7 km², 총저수용량 940.7 MCM, 유효저수용량은 605.9 MCM이다. 수력발전 설비용량은 총 108,000 kW (27,000 * 4기), 유효낙차 74.5 m, 최대사용수량 185 CMS, 년평균 발전량 348 GWh를 생산하도록 되어있다. 화천댐은 수력발전을 주목적으로 건설 되었으나, 현재는 한강 하류부의 홍수피해를 경감하기 위하여 우기전 EL. 175.0 m까지 예비방류하므로써 278.5 MCM의 홍수조절기능도 갖고 있다.

화천댐 운영을 위한 시스템도는 직상류의 평화의댐 영향과 직하류의 춘천댐에 의한 배수위 영향을 무시하면 Fig. 1과 같이 매우 간단하게 나타낼 수 있다.

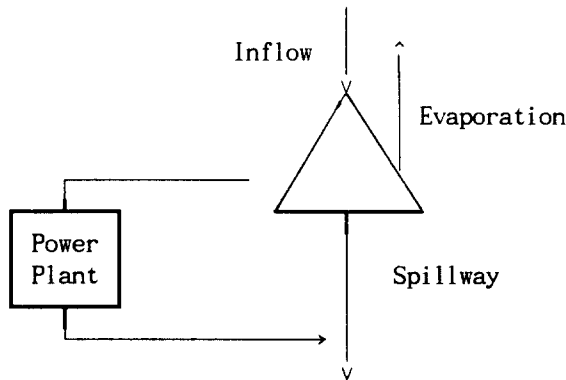


Fig. 1 Schematic Representation of the Hwachon Reservoir System

1966년부터 1992년까지의 화천댐 운영실적중 용수공급능력을 평가할 수 있는 방류량과 기대편익을 평가할 수 있는 발전량에 대한 최대, 최소 및 평균에 대하여 Table 1에서 보여주고 있다.

이들자료중 평균 방류량은 100.5 CMS(년평균 3,172 MCM)이며, 지금까지의 운영자료중 최소 방류량이 13.39 MCM (5.16CMS)으로 남한강 주운 타당성 조사시 제시되었던 기준갈수량 11.9 CMS에 50%에 불과하며, 월단위 전체기간중 3 %가 기준갈수량 이하로 운영되었다. 분석기간동안의 발전실적을 보면 년평균 발전생산량은 314 GWh로서, 시설용량을 기준으로한 년평균 발전량인 348 GWh의 90%수준을 유지하고 있다.

Table 1 Discharges and Hydro Energy Statistic Data of the Hwachon Dam

Month	Discharge (MCM)			Hydro Energy (GWh)		
	Maximum	Minimum	Average	Maximum	Minimum	Average
Jan.	307.75	13.39	123.11	33.10	1.30	15.00
Feb.	188.17	21.77	107.63	20.50	12.00	12.00
Mar.	206.24	29.46	114.83	29.50	3.06	13.00
Apr.	399.17	18.14	158.00	57.57	1.50	20.20
May.	463.36	41.52	217.35	72.70	5.10	30.20
Jun.	808.70	49.25	216.88	51.90	4.70	26.40
Jul.	2182.90	77.67	561.03	80.00	8.10	38.53
Aug.	2252.27	75.00	695.00	79.80	9.30	53.80
Sep.	1438.56	88.13	544.87	74.90	9.80	47.10
Oct.	455.33	24.11	158.25	48.00	2.40	21.50
Nov.	565.06	31.10	134.61	54.60	2.90	16.70
Dec.	365.07	18.75	140.63	53.50	1.80	19.60

3.2 방류량 하한조건의 결정

화천댐의 과거운영실적중 여수로 방류를 포함한 총 방류량 실적자료에 대한 확률분석결과는 Table 1에서 알 수 있듯이 최소 방류량의 경우 13.39 MCM에 불과하며, 기준갈수량에 해당하는 신뢰도가 97 %이다. 이는 과거의 댐운영이 유입량이나 하류의 용수수급조건을 고려하지 않고 전력 공급 측면에서 이루어진 결과라 할 수 있다.

화천댐의 과거운영 자료중 평화의댐 건설로 인하여 화천댐이 정상적으로 운영되지 못한 1987년부터 1989년까지의 방류량 자료는 신뢰성이 결여되므로 이 기간의 자료를 제외한 1963년부터 1986년까지와 1990년부터 1992년까지 24년간의 방류실적을 월별 초과확률로 구하여 정리하면 Table 2와 같다.

본 연구에서는 현재의 화천댐 운영목적은 유지하면서 하류 보장용수량을 증대시키고자 이들 월별 초과확률별 방류량 자료를 저수지 운영의 하한 방류량 자료로 적용하고자 한다. 이들 방류량 자료는 Weibull의 Plotting Position 분포에 의거 산정할 수 있으며 식(6)에 대한 확률밀도함수 및 누가확률은 다음과 같이 정의된다.

$$f_x(u) = (k/a)(u/a)^{k-1} \exp[-(u/a)^k] \dots\dots\dots (7)$$

$$F_x(u) = 1 - \exp[-(u/a)^k] \dots\dots\dots (8)$$

$u > 0 ; a, k > 0$

방류량에 대한 제약조건은 식(6)에서와 같이 여수로 방류와 발전에 의한 방류량의 월별 하한 및 상한값은 현재 운영상태의 발전량 최대화 운영과 화천댐 지점에서의 기준갈수량 11.9 CMS는 상시 유지하여야 할 최소 유지유량으로서 본 연구에서 검토되는 대안별 방류량 하한조건은 대안 I, II, III의 경우 하한 방류량은 31.3 MCM(11.9 CMS), 대안 IV에서는 초과확률별 방류량을 하한 제약조건으로 적용하였다.

Table 2 Monthly Exceedance Probability of Discharges from the Hwachon Dam in 1966 to 1986 & 1990 to 1992 Unit : MCM

Prob	Jan.	Feb.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.	Aug.	Sep.	Oct.	Nov.	Dec.
52.0	123.2	113.7	115.2	170.6	196.1	178.8	267.8	503.5	404.4	152.7	119.2	142.0
56.0	120.5	110.2	115.2	142.6	192.8	176.3	267.8	498.2	378.4	150.0	116.6	131.2
60.0	115.2	108.9	112.5	121.8	190.2	174.2	230.3	490.1	360.3	128.6	106.3	120.5
64.0	115.2	106.4	102.9	114.0	174.1	168.5	219.6	439.3	347.3	115.2	93.3	107.1
68.0	112.5	101.6	99.1	103.7	171.4	150.3	214.3	399.1	326.6	115.2	93.3	102.3
72.0	112.5	100.2	97.2	98.7	166.1	116.6	208.9	399.1	316.2	109.8	90.7	101.8
76.0	102.3	94.3	83.0	89.2	120.5	114.0	176.8	377.7	303.3	101.8	82.9	99.1
80.0	99.1	91.9	72.3	80.4	120.5	85.5	144.6	310.7	228.1	93.7	64.8	96.4
84.0	91.1	91.9	72.3	70.0	117.8	80.4	142.0	277.8	194.4	77.7	57.0	77.7
88.0	88.4	49.8	48.2	70.0	106.1	75.2	122.9	195.5	140.0	75.0	49.2	72.3
92.0	69.6	36.3	37.5	41.5	88.4	70.0	99.1	165.3	124.4	48.2	38.9	72.3
96.0	13.4	24.2	34.8	18.1	41.5	62.2	77.7	75.0	88.1	24.1	38.9	61.6

4. 최적운영 모형의 적용

제 2장의 저수지 운영방안을 기본으로 제 3장에서 작성된 자료를 통하여 연구목적에 부합되는 분석을 실시하였다. 식(1)에 의한 발전에너지 생산만을 목적으로 한 현재의 댐 운영에 따른 발전량의 최대화 (대안 I)의 경우와 식(2)에 의한 보장발전량 최대화의 경우 (대안 II), 보장용수공급량의 최대화의 경우 (대안 III), 하한 방류량을 제약하면서 발전에너지 생산 최대화를 추구하는 경우 (대안 IV)에 대하여 적용한 결과중 기대발전량 및 용수공급 가능량은 Table 3 및 4와 같다.

Table 3 Comparison of Hydropower Energy between Historical and Alternatives

Unit : GWh/MON

Exceedance Probability	Historical Data	Alternative I	Alternative II	Alternative III	Alternative IV
.500	19.6	30.62	16.10	18.36	22.58
.800	10.7	5.31	14.92	15.66	12.86
.850	9.1	5.20	14.82	15.19	12.03
.900	6.8	5.13	14.63	14.29	8.11
.950	3.8	5.05	13.46	13.63	7.62
.990	1.7	4.92	13.30	12.06	6.84

Table 4 Comparison of Water Supply between Historical and Alternatives

Unit : MCM/MON

Exceedance Probability	Historical Data	Alternative I	Alternative II	Alternative III	Alternative IV
.500	152.67	181.57	109.16	116.72	140.44
.800	94.35	32.90	92.57	103.12	79.94
.850	82.94	32.25	90.31	102.81	78.26
.900	69.81	31.99	89.30	94.15	51.07
.950	38.88	31.55	85.91	92.96	49.89
.990	18.75	31.34	80.28	92.26	48.60

위의 결과를 신뢰도 측면에서 분석하면, Table 3에서와 같이 대안 I을 제외한 대안 II, III, IV의 경우가 과거운영실적에 비하여 편익 및 운영의 안정성을 기대할 수 있을 것으로 나타났으며, Table 4에서와 같이 용수공급 측면에서도 대안 II, III, IV의 경우가 과거실적에 비하여 월등한 신뢰성을 갖고 있음을 알 수 있다.

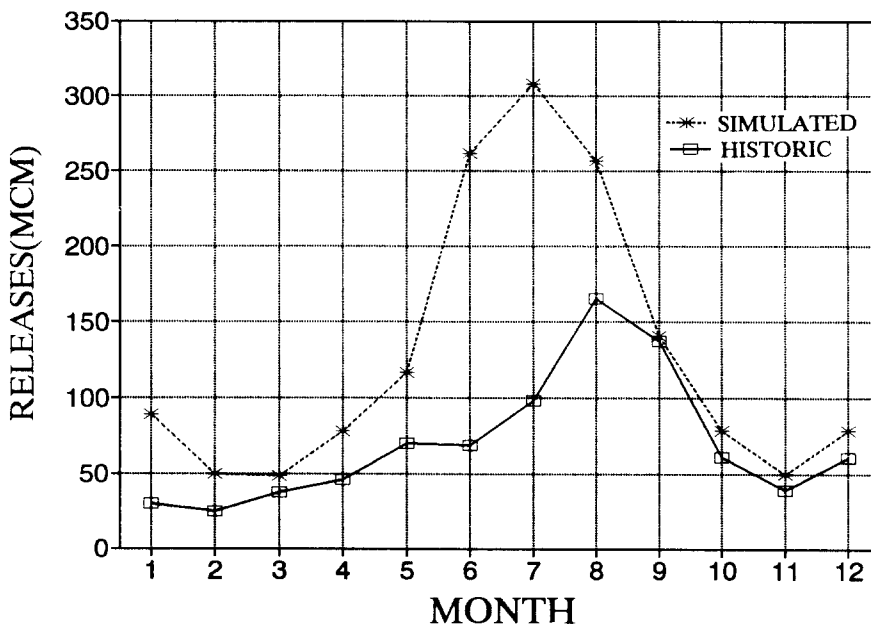


Fig. 2 Comparison of Firm Release between Historical and Simulated

한편 본 연구의 주된 관심사였던 월별 보장유량 증대에 대하여는 Fig. 2에서 알 수 있듯이 9월을 제외한 전 운영기간에서 상당한 증대효과가 있어 앞으로의 화천댐 운영은 하류의 용수공급이나 하천환경 개선을 위하여 운영방법에 대한 수정이 필요하며, 발전에너지 생산의 손실에 비하여 용수공급측면에서의 기대편익 증대가 상당한 것으로 분석되었다. 따라서 화천댐 운영의 개선에 대한 보다 상세한 검토가 필요한 것으로 나타났다.

5. 결 론

현재 급격히 증가하고 있는 한강하류의 용수공급을 고려할때 화천댐 운영방안의 개선을 통하여 용수수요에 적극 대처하기위한 방안이 필요한 실정이다. 이러한 문제점의 해결방안을 찾기 위하여 최적운영 방안으로 현재의 댐운영상에 큰 무리가 없는 측면에서 과거의 발전생산량을 최대한 유지하면서 보장용수공급량을 증대시킬 수 있는 방안을 찾기 위하여 네가지의 대안을 대상으로 분석하여, 얻어진 결론은 다음과 같다.

첫째, 보장 발전량 최대화의 경우와 보장 용수공급량 최대화의 경우는 발전 및 용수공급의 측면에서 가장 바람직한 방안으로 나타났으며, 95%의 보장 용수공급량은 연간 1,116 MCM의 공급이 가능하다.

둘째, 하한 방류량을 제약하는 경우에는 발전 및 용수공급량이 다소 떨어지나, 95% 보장 할 수 있는 용수공급량은 연간 599MCM으로서, 과거 운영 실적에 비하여 연간 113 MCM의 용수공급량 증대가 가능한 것으로 나타났다.

셋째, 한강하류지역 용수공급량 증대의 중요성을 감안할 때, 댐하류 유황개선 및 용수공급량 증대를 위해서는 하한 방류량 제약조건을 고려하여도 연간 발전량 손실은 거의 없는 반면, 용수공급량은 상당히 증가하므로 화천댐의 최적운영 대안으로 분석되었다.

넷째, 화천댐의 최적운영을 위한 저수지 운영 기준을 제시하였다. 이와 같은 결과에 대하여 현재의 발전위주의 댐운영체계에 홍수조절을 위한 하절기 제한수위를 유지하면서 하류 용수공급량 증대를 위한 보다 더 구체적이고 합리적인 방안으로 운영 할 경우, 유역규모 및 댐시설규모를 고려 할때, 다목적댐으로서의 역할이 기대된다.

※ 참고 문헌

- 1) 고 석 구, "신뢰도를 고려한 한강수계 저수지 군의 최적 운영", 제 10 회 한국대댐학회 논문집, 한국대댐학회, 1990.
- 2) 서 남 수, 윤 용 남, "단일 다목적댐의 최적운영 방안을위한 시스템 모의 기법의 응용", 대한토목학회지, 제 26 권 제 3 호, pp.99-104, 1978.
- 3) 이 광 만, "댐하류의 하천 수질을 고려한 다목적 저수지 최적 운영", 중앙대학교 대학원 박사학위 논문, 1993.
- 4) 한국전력공사, 수력발전소 운영 자료집, 1992
- 5) AllenKent, James G. Williams, "Encyclopedia of Microcomputers", Marcel Dekker, Inc., 1990.
- 6) Haines, Y. Y., D. A. Wismer, and L. S. Larsdon, "On Bicriterion Formulation of Integrated System Identification and System Optimization", IEEE Transation on System, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-1, pp.296-297, 1971.
- 7) Labadie, John W., "Dynamic Programming with the Microcomputer Program CSUDP", Civil Engineering Department, Colorado State University, Fort Collins, Co. 1988.
- 8) Larry W. Mays, Yeou-Tung, "Hydrosystems Engineering and Management", McGraw-Hill, Inc.
- 9) Ray K. Linsley, Jr., Max A. Kohler, Joseph L. H. Paulhus, "Hydrology for Engineers", McGraw-Hill, Inc., 1988.