

〈論 文〉

信賴도를 考慮한 多目的 貯水池의 月別 運營律

Monthly Operating Rules Considering Reliability Levels for Multipurpose Reservoir Systems

李 熙 昇* 沈 淳 輔** 高 錫 九***
LEE Hee Sung SHIM Soon Bo KO Seok Ku

Abstract □ This paper presents a methodology of developing reservoir operating rules which can consider the reliability levels incorporated with the discharge policy. The operating rules were derived based on the regression and risk analysis of the optimally operated results by using the long term historical and generated reservoir inflows.

The methodology was applied to the operation of the Chungju reservoir system which is consisted of two reservoirs and powerplants, and monthly operating rules were developed. Simulations were performed by using the developed operating rules, and the results were compared with the historical operation result. The comparison shows that the developed operating rules can not only significantly improve the output from the existing system but also improve the reliability incorporated with the output.

要 旨: 본 연구에서는 방류량 결정에 있어 신뢰도 수준을 고려한 저수지 運營律을 개발할 수 있는 방법론을 제시하고 있다. 이와같은 저수지 운영율은 장기간의 유입량 자료와 模擬 발생된 자료를 이용, 최적화 기법에 의한 운영 결과를 위험도(신뢰도) 분석 및 관련 인자들과의 상관 분석을 실시하여 도출하였다.

이와같은 방법론을 본래와 조정지점으로 구성되어 있는 충주 저수지 시스템의 운영에 적용하여 월별 운영율을 개발하였으며, 또한 개발된 운영율을 검증하기 위한 모의 운영을 실시하여 과거 운영 실적과 비교하였다. 비교 결과는 금번 개발된 운영율을 이용할 경우 기존 시스템의 期待 便益을 상당히 증가시킬 수 있을 뿐만 아니라 운영에 따른 信賴度도 개선시킬 수 있는 것으로 나타났다.

1. 序 論

저수지 시스템의 운영은 강우로 부터의 유역 유출에 의한 저수지 유입량과 저수지에 의한 저류 및 放流 量의 결정등으로 구성된다. 강우는 자연 현상중에서 가장 예측하기 어렵고 통제 불가능한 요소중의 하나이며, 강우에 의한 유입량도 이러한 推計學的 성질을 갖고 있어서 시간과 공간상으로 항상 서로 다르게 발

생된다. 따라서 임의성이 강한 저수지 유입량에 대처 하면서 기대되는 편익을 극대화 시킬 수 있는 최적의 방류 계획을 결정한다는 것은 쉬운 일이 아니며, 방류 계획에 따라 적절한 시기에 적정 용수공급등 본래의 목적을 달성하면서 전력 생산을 극대화 하는데에는 소기의 목적을 달성하지 못할 위험도가 항상 따른다.

최적화 기법을 도입한 저수지 운영율은 G. K. Young(1967)이 처음 제시하였으며 당해년도의 방류량

* 정회원, 한국수자원공사, 기술본부장

** 정회원, 충북대학교 토목공학과, 교수

*** 정회원, 한국수자원공사 수자원연구소 책임연구원, 공학박사

을 연초 저류량과 익년도까지의 예상 유입량의 함수로 보았다. ReVelle 등 (1969)은 線型 決定律을 이용하는 저수지 운영을 제시하였으며, Ford 등 (1981)은 저수지의 저수 용량을 최적 배분하여 저류상태에 따라 서로 다르게 운영할 수 있도록 하였다. 이 밖에도 Askew(1974), Karamouz와 Houck(1987) 및 Chung 등 (1988) 도 여러가지 형태의 저수지 운영을 제시하였으나, 각각의 저수지 특성상 우리 실정에 알맞는 다목적 저수지의 운영을 개발이 요구되고 있었다. 한편 국내에서는 한국 수자원 공사를 중심으로 일부 연구가 있었으나(高, 1986, 1990; 權, 1986) 개발된 운영에 있어 결정변수와 상태변수의 相關性 결여나 信賴度를 고려할 수 없는 문제 등으로 사용되지 못하였다.

본 연구의 목적은 다목적 저수지의 유입량 및 저류 상태 등에 따른 방류량 결정에 있어 기대 편익을 증대시키면서 신뢰도나 위험도를 고려할 수 있는 다목적 저수지의 월별 운영(operating rule)을 개발하는데 있으며, 운영은 방류량 결정을 위한 월별 Rule Curve 와 신뢰도 수준에 따른 저수지의 저수 용량의 월별 배분으로 구성되어 있다. 이러한 개념을 본담과 조정지댐 등 2개의 수력 발전소로 구성된 忠州 다목적 저수지 시스템의 連繫 運營을 위한 신뢰도를 고려한 저수지의 월별 운영을 개발에 적용하였으며, 개발된 운영에 따른 모의 운영을 수행하여 과거 운영 실적과 비교함으로써 개발된 운영에 대한 효율성의 검증을 실시하였다.

2. 貯水池의 最適 運營과 運營律

저수지 운영을 위한 Rule Curve와 같은 운영을이런 추계학적 성질을 갖는 과거의 저수지 유입량과 용수 공급이나 홍수 조절등 시스템에 주어진 기본 목적을 달성하면서 수력발전등의 기대편익이 증대될 수 있는 상관 관계 함수를 말한다. 다시말해서 운영을 사용하여 저수지를 운영할 경우에는 다음과 같은 損失 函數의 값이 가능한 최소가 되어야 한다.

$$Z = \min \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T L_{jt}(X_{jt}, Q_{jt}, I_{jt}) \quad (1)$$

여기에서 손실 함수 L_{jt} 는 저수지의 저류 상태인 X_{jt} 및 유입량 I_{jt} , 방류량 Q_{jt} 에 따라 결정되며, 이론적으로는 손실 함수의 값이 "0"이 되기 위해서는 최적 상태로 저수지를 운영할 수 있는 운영을 개발하여야 하

나 이것은 저수지 유입량이 임의성이 있어 예측이 곤란하므로 현실적으로 최적 상태로 저수지를 운영한다는 것은 불가능한 일이다. 그러나 장기간의 관측된 유입량 자료에 의거 저수지를 최적 상태로 모의 운영한 후 최적운영 결과를 분석함으로써 저수지의 운영을 개발할 수 있다. 따라서 운영을 개발을 위한 다목적 저수지의 최적 운영 모형에서는 장기간의 자료를 분석할 수 있어야 하고 다목적댐의 각 목적을 동시에 고려할 수 있어야 한다.

다목적 분석 기법을 적용하면 여러 목적을 동시에 고려할 수 있는데, 가장 보편적으로 사용되고 있는 Weighting 기법(Zadeh, 1963)에서는 加重值를 각 목적에 부여하여 단일 목적 함수로 변환할 수 있으며, 각 목적의 가중치를 변화시키면서 最適解에 대한 결과의 의사결정을 위한 시스템 기술자에게 만족할 만한 수준일 때의 값을 선택한다.

$$F = \max \left[\sum_{i=1}^M W_i \left\{ \sum_{j=1}^N \sum_{t=1}^T f_{ij}(X_{jt}, X_{jt+1}, Q_{jt}) \right\} \right] \quad (2)$$

s. t.

$$G_{kjt}(X_{jt}, X_{jt+1}, Q_{jt}) = 0 \quad (3)$$

for $k=1, \dots, L$; $j=1, \dots, N$; $t=1, \dots, T$

식 (2)와 (3)에서는 M개의 목적을 고려하는 N개의 저수지 시스템으로 부터 분석 기간 T동안에 기대되는 편익을 극대화 시키도록 되어 있다. $f_{ij}(\cdot)$ 와 $G_{kjt}(\cdot)$ 는 目的 函數와 制約 條件을 나타내는 함수이며, X_{jt} 와 Q_{jt} 는 각 저수지의 저류 상태 및 기간 t동안의 방류량을 나타내고 W_i 는 각 목적에 주어진 가중치이며, L은 제약 조건의 수이다.

상기의 최적화 문제에서 수력발전 문제와 저수지 증발량 등을 고려할 경우에는 목적 함수와 제약조건은 非線型이며, 저수지 운영을 도출 문제는 장기간의 時系列 분석을 필요로 하므로 최적화 모형의 선택에 있어서는 비선형 문제와 장기간의 시계열 분석을 동시에 해결해 주어야 하는 점을 고려하여야 한다.

3. 運營律의 導出 및 信賴度 賦與

3.1 貯水池 運營 RULE CURVE의 導出

Rule Curve는 저수지 운영의 하나이며 과거의 유입량 자료와 수력 발전 및 용수공급 등 저수지에 주어

진 다목적 기능을 감안하여 確定論的 최적화 성과를 時系列로 분석함으로써 Rule Curve를 도출해 낼 수 있다. 특히 최적 저류량의 軌跡線에 대한 시계열 분석에 있어서는 장기간의 자료가 있어야만 보다 신뢰성 있는 일반적 특성을 抽出해 낼 수 있다. Rule Curve중 월간 방류량 결정을 위한 운영율을 도출하고자 할 때에는 저수지의 최적 운영 결과 중 최적 방류량과 최적 저류량 및 유입량의 함수를 시스템 기술자가 예상하는 각 인자별 상관 분석을 실시하여 보다 신뢰성 있는 상관 함수를 찾아내는 일이다.

$$Q_{jt}=f(X_j \tau, I_j \tau) ; \tau \in t=1, \dots, 12 \quad (4)$$

여기에서 τ 는 시계열 분석 기간의 한 요소 이거나

또는 전체 분석 기간 중의 몇 개의 조합된 요소이다. 그러나 일반적으로 j 저수지에서 t 월 동안의 월간 방류량 Q_{jt} 는 저수지의 저류량 X_{jt} 와 상관 관계가 있거나, 저류량 X_{jt} 및 유입량 I_{jt} 와 함께 상관 관계가 있다고 볼 수 있다.

우리나라 최대 규모의 충주 다목적 저수지 시스템에 적용하여 실용성이 있는 Rule Curve를 개발하기 위해서 과거 59년 동안의 월별 유입량 자료를 이용하여 최적 운영을 실시한 후 濁水 및 豐水를 대표할 수 있는 4월과 7월에 대하여 식 (4)에 따라 각종 상관 분석을 수행하였으며, 분석 결과중 상관성이 우수한 것으로 나타난 " $Q_{jt}=a_i X_{jt}+b_i$ " 및 " $Q_{jt}=a_i(X_{jt}+I_{jt})+b_i$ "의 기본식을 근거로 본댐 지점과 조정지댐 지점에서 제어할 수 있는 4가지의 결과가 표-1에 나타나 있다.

Table-1 Rule Curve of April and July for the Chungju System

Rule Curve	Mon	Zoning(MCM)	\hat{a}_i	\hat{b}_i	R
$Q_{1t}=\hat{a}_i V_t + \hat{b}_i$ $V_t=X_t + I_t$	t=4	$668 \leq V_t < 1200$	+0.345767	- 112.0	0.840779
$1200 \leq V_t < 2580$		-0.032885	+ 298.0	0.996286*	
$2580 < V_t$		+0.989813	-2357.0	0.997927	
$Q_{1t}=\hat{a}_i S_t + \hat{b}_i$ $S_t=X_t + I_{1t} + I_{2t}$	t=4	$679 \leq S_t < 1200$	+0.326735	- 101.0	0.804224
$1200 \leq S_t < 2600$		-0.035285	+ 305.0	0.997011*	
$2600 < S_t$		+0.979177	-2433.0	0.961489	
$Q_{2t}=\hat{a}_i V_t + \hat{b}_i$ $V_t=X_t + I_t$	t=4	$679 \leq V_t < 1200$	+0.465943	- 236.0	0.887236
$1200 \leq V_t < 2600$		-0.016921	+ 255.0	0.998461*	
$2600 < V_t$		+0.957741	-2162.0	0.951017	
$Q_{2t}=\hat{a}_i S_t + \hat{b}_i$ $S_t=X_t + I_{1t} + I_{2t}$	t=4	$679 \leq S_t < 1200$	+0.466724	- 248.0	0.897123
$1200 \leq S_t < 2600$		+0.013846	+ 250.0	0.999668*	
$2600 < S_t$		+0.961633	-2267.0	0.993387	
$Q_{1t}=\hat{a}_i V_t + \hat{b}_i$ $V_t=X_t + I_t$	t=7	$982 \leq V_t < 2400$	+0.091171	+ 126.0	0.879561*
		$2400 < V_t$	+0.921483	-1819.0	0.957309
$Q_{1t}=\hat{a}_i S_t + \hat{b}_i$ $S_t=X_t + I_{1t} + I_{2t}$	t=7	$992 \leq S_t < 2650$	+0.017242	+ 244.0	0.872744*
		$2650 < S_t$	+0.701516	-1311.0	0.9251135
$Q_{2t}=\hat{a}_i V_t + \hat{b}_i$ $V_t=X_t + I_t$	t=7	$992 \leq V_t < 2650$	+0.180796	+ 59.0	0.877738*
		$2650 < V_t$	+1.792470	-2364.0	0.940104
$Q_{2t}=\hat{a}_i S_t + \hat{b}_i$ $S_t=X_t + I_{1t} + I_{2t}$	t=7	$992 \leq S_t < 2650$	+0.191279	+ 26.0	0.889269*
		$2650 < S_t$	+0.959904	-1941.0	0.980807

*"표의 값은 45°로 변환하여 산정한 상관계수 임

표-1의 4가지 상관 분석 결과에서 알 수 있듯이 당해월의 최적 방류량은 당해월의 최적 저류 상태 뿐 아니라 시스템에 유입하는 추계학적 요소인 당해월 동안의 유입량에 따라 상관성이 보다 큰 것으로 나타났다. 특히 충주 시스템에 있어서는 본댐 지점에서의 최적 방류량은 식 (5)와 같이 본댐의 월초 최적 저류 상태와 당해월 동안의 본댐 지점의 유입량에 따라 상관성이 보다 크고, 조정지댐 지점에서의 최적 방류량은 식 (6) 과 같이 본댐의 월초 최적 저류 상태와 당해월 동안의 본댐 및 조정지댐의 유입량에 따라 상관성이 보다 큰 것으로 나타났다.

$$Q_{1t} = \hat{a}V_t + \hat{b}, V_t = X_t + I_{1t} \quad (5)$$

$$Q_{2t} = \hat{a}S_t + \hat{b}, S_t = X_t + I_{1t} + I_{2t} \quad (6)$$

여기에서, Q_{1t} 및 Q_{2t} 는 충주 본댐 및 조정지댐에서의 월별 방류량이고 X_t 는 본댐의 월초 저류량이며, I_{1t} 및 I_{2t} 는 본댐 및 조정지댐에 유입하는 월간 Local 유입량이며, \hat{a} 및 \hat{b} 는 월별, 구간별 線型 回歸 分析에 의해서 산정한 媒介變數이다. 그림-1은 충주 시스템의 과거 59년 동안의 월별 유입량 자료를 이용하여 최적 운영을 실시한 후 식 (6) 에 근거한 4 월과 7 월의 상관 분석 결과에 대한 Graphical Display로써 상관성이 매우 큰 것으로 나타났다.

3.2 信賴度別 貯水容量 配分 및 信賴度 分析

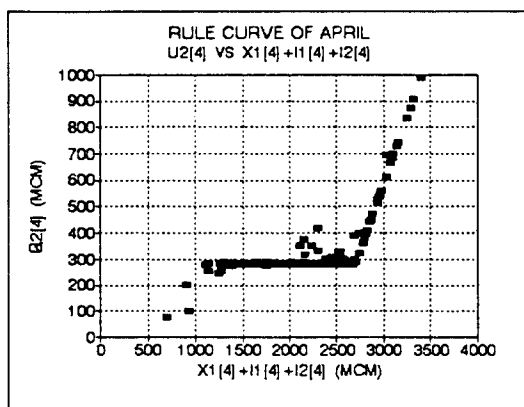
장기간의 과거 측정 자료나 모의 발생 자료에 의거 저수지의 최적 운영을 실시하여 상태 변수인 저수지

의 최적 저류량이나 決定 變數인 최적 방류량을 월별로 時系列 통계 분석하여 信賴度나 危險度 등의 확률에 따라 저류량이나 방류량을 배분할 수 있다. 예로써 충주 다목적 저수지 시스템에 있어 59년 동안의 과거 월별 유입량 자료와 150년 동안의 모의 자료를 사용하여 連繫 最適 運營한 결과 중 본댐 저수지의 최적 저류량이 대부분 좌측으로 왜곡된 분포를 보여 Gamma 분포에서 3 변수 분포중의 하나인 Log-Pearson Type III 分布에 의한 확률 빈도별 배분 결과가 그림-2에 나타나 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 최적 저류량에 대한 變動 係數가 상당히 적은 편이어서 월별로 유지하여야 할 수위의 Guide Line으로 사용할 수 있으며, 실제 운영에 있어 고려할 수 있는 신뢰도 범위를 20%에서 80% 수준이라고 볼 때 유지하여야 할 希望 貯水率은 우기 직전이나 우기인 4월에서 7월 까지를 제외하고는 그 범위가 매우 소폭임을 알 수 있다.

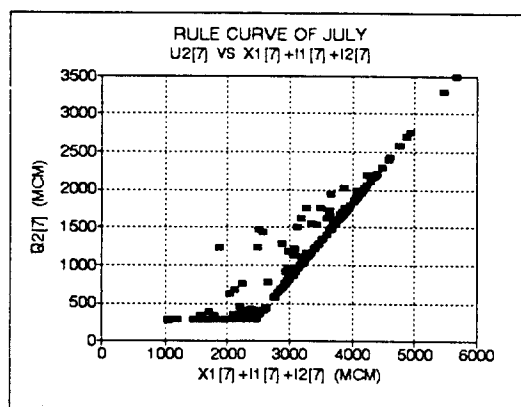
따라서 의사 결정을 위한 시스템 기술자가 정한 신뢰도 수준에 따라 必要 下限 水位나 必要 上限 水位의 개념을 도입하여 월별로 유지하여야 할 貯水率을 산정할 수 있으며, 실제 운영 과정에 있어 지정한 신뢰도 수준을 벗어날 경우에는 수위 저하에 따른 용수 부족 또는 수력 발전 편익 감소나 수위 상승에 따른 餘水路 방류에 따라 수력 발전 손실등의 가능성이 증대된다.

4. 適用 및 考察

4.1 適用 概要



(a) Operating Rule of April



(b) Operating Rule of July

Figure-1 Operating Rules of the Chungju System

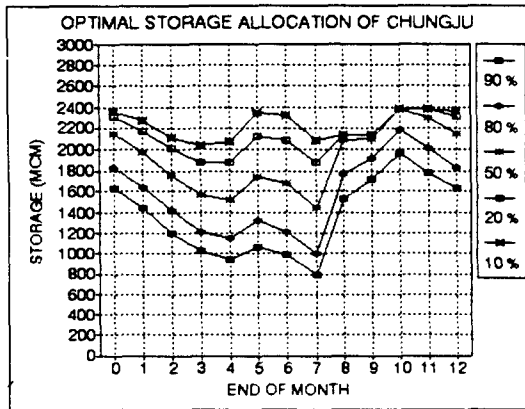


Figure-2 Optimal Storage Allocation According to Reliability Levels

신뢰도를 고려한 저수지의 운영을 도출 기법은 兪州 본댐 및 조정지댐의 連繫 運營에 적용하였다. 충주댐 시스템은 홍수조절, 수력발전 및 용수공급 등 우리나라 최대 규모의 다목적댐 사업으로서 본댐은 총 27.5억 m³의 물을 저류할 수 있으며, 400,000Kw의 수력 발전소가 있고 댐하류 약 20Km 지점에 조정지댐 및 12,000Kw의 제2수력 발전소가 있다.

충주댐 시스템의 월별 운영을 도출을 위하여 개발한 최적화 모형에서는 운영기간 중 발생하는 전력량 및 保障 出力과 조정지댐 하류에서의 保障 流下量의 극대화 등 세가지의 다목적 함수를 고려하였다. 이들 목적함수 중 보장 출력 및 보장 유하량은 Haines 등 (1971)이 제안한 ϵ -constraint 기법을 적용하면 제약 조건으로 변환하여 전력량만을 극대화 하는 단일 목적함수로 간주할 수 있지만, 운영을 도출을 위해서는 장기간의 분석이 필요하므로 ϵ -constraint 기법 적용시 극심한 한발 기간이 포함되면 제약 조건에 비해 유입량이 너무 적어서 적정 분석이 곤란한 경우가 발생하게 된다. 이러한 점을 고려하여 다목적 분석 기법의 하나인 Zadeh(1963)의 Weighting 기법을 적용하였다. 그러나 세가지 목적 중 발전량에 대한 목적함수는 전 운영 기간에 대해서 累計 형태이지만, 보장 유하량이나 보장 출력은 기간중 최소값을 최대화 하는 Max-(Min) 형태로써 발전량과는 동적 특성이 달라 Weighting 기법 적용을 위해서 누계 형태로 변환하였다. 즉 기간중 최소 값을 최대화 하는 보장 유하량이나 보장 출력 문제는 年평균 유하량이나 발전시설 용량을 목표 값으로 정하고 목표 값에 미달되는 값의 평방의 누계 값을 최소화 하는 문제로 변환하여 서로 다른 동적 특성 문제를 해결하였다.

최적화 문제에 있어서는 문제의 非線型性和 長期間의 분석을 요하는 점을 고려하여 動的 計劃 技法을 적용하였으며, 조정지댐 저수지의 有效 貯水容量이 본댐 저수지 유효 저수 용량의 0.6% 정도에 불과하고, 조정지는 월간 유입량에 비해서 저수 용량이 매우 적어 월간 제어가 사실상 불가능하므로 조정지의 저수지 수위를 평균 수위로 일정하다고 보아 1次元 문제로 해석하였다.

4.2 運營律의 開發

충주댐 시스템 운영을 위한 Rule Curve의 개발과 신뢰도에 따른 貯水容量 배분을 위하여 본댐과 조정지댐 지점에 대한 59년 동안의 기록 유입량 자료 (1917-1940, 1956~1990)와 汎用으로 개발된 複數 地點에 대한 季節型 自己 回歸 模型인 MPAR(1Ko, 1989)에 의해서 발생된 150년 동안의 모의 자료를 사용하여 장기간의 최적 운영을 실시하였다. 월별 Rule Curve는 식(5)와 식(6)에 의해서 구간별로 線型 回歸 分析한 결과 우기의 일부 기간을 제외하고는 상관성이 매우 양호한 것으로 나타났으며, 특히 식(6)과 같이 조정지댐 하류 지점을 기준으로 월간 방류량을 결정할 수 있도록 하는 방안이 상관성이 약간 우수한 것으로 나타났다. 표-2 및 표-3에는 식(5) 및 (6)에 의거 충주 본댐 및 조정지댐 지점에서 월간 방류량을 결정할 수 있는 월별 Rule Curve 식을 보여주고 있다.

월별 Rule Curve 식에 있어서는 저수지의 月初 貯留量과 月間 流入量의 합으로 정의되는 可用 流量의 크

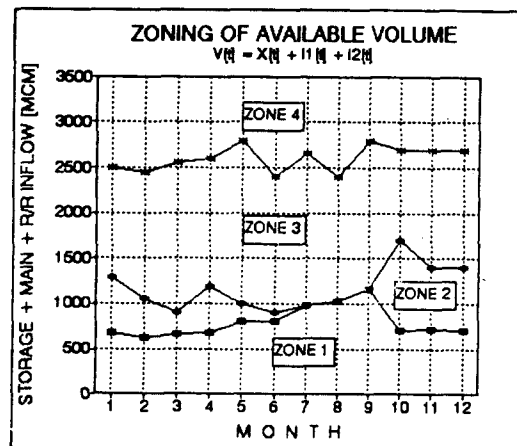


Figure-3 Monthly Zoning of the Available Storages, Chungju System

Table-2 Monthly Rule Curves Controllable at the Chungju Main Dam, Unit:MCM

Mon	Zoning	Regression Coef	
		a _t	b _t
1	650 ≤ V _t < 1400	+0.151817	+ 83
	1400 ≤ V _t < 2500	+0.004303	+ 278
2	614 ≤ V _t < 1100	+0.363028	- 122
	1100 ≤ V _t < 2400	-0.017452	+ 273
3	646 ≤ V _t < 1000	+0.573369	- 267
	1000 ≤ V _t < 2500	-0.017452	+ 285
	2500 ≤ V _t	+0.899242	-2087
4	668 ≤ V _t < 1200	+0.345767	- 112
	1200 ≤ V _t < 2580	+0.032885	+ 298
	2580 ≤ V _t	+0.989813	-2357
5	772 ≤ V _t < 900	+1.087842	- 687
	900 ≤ V _t < 2600	+0.092287	+ 123
	2600 ≤ V _t	+0.750958	-1520
6	775 ≤ V _t < 900	+0.999354	- 598
	900 ≤ V _t < 2300	+0.308852	- 53
	2300 ≤ V _t	+0.588528	- 777
7	982 ≤ V _t < 2400	+0.091171	+ 126
	2400 ≤ V _t	+0.921483	-1819
8	985 ≤ V _t < 2300	-0.017188	+ 268
	2300 ≤ V _t	+0.951233	-1954
9	1133 ≤ V _t < 2600	-0.098096	+ 449
	2600 ≤ V _t	+0.998282	-2382
10	668 ≤ V _t < 1800	+0.163906	+ 6
	1800 ≤ V _t < 2600	-0.015230	+ 294
	2600 ≤ V _t	+0.983959	-2337
11	693 ≤ V _t < 1600	+0.198203	- 41
	1600 ≤ V _t < 2600	-0.016520	+ 288
	2600 ≤ V _t	+0.889484	-2087
12	674 ≤ V _t < 1700	+0.144228	+ 36
	1700 ≤ V _t < 2500	-0.013256	+ 295
	2500 ≤ V _t	+0.295522	- 504

* ($\hat{Q}_{1t} = a_t V_t + b_t$, $V_t = X_t + I_{1t}$)

기에 따라 운영율에 變曲點이 있는데, 이 변곡점을 운영기준으로 감안하여 구간별로 분리할 수 있다. 여기에서 월간 방류량이나 변곡점은 일정한 값이 아니라 월초에 가정한 유입량에 따라 방류량을 결정하고 월중에 유입량의 실적에 따라 변곡점과 방류량도 조정

Table-3 Monthly Rule Curves Controllable at the Reregulation Dam, Unit:MCM

Mon	Zoning	Regression Coef	
		a _t	b _t
1	669 ≤ S _t < 1300	+0.335367	- 87
	1300 ≤ S _t < 2500	+0.002989	+ 285
2	622 ≤ S _t < 1050	+0.609618	- 346
	1050 ≤ S _t < 2450	+0.000140	+ 264
3	658 ≤ S _t < 900	+1.000032	- 598
	900 ≤ S _t < 2550	+0.012767	+ 267
	2550 ≤ S _t	+0.903950	-2095
4	679 ≤ S _t < 1200	+0.466724	- 248
	1200 ≤ S _t < 2600	+0.013846	+ 260
	2600 ≤ S _t	+0.961633	-2267
5	803 ≤ S _t < 1000	+0.741966	- 403
	1000 ≤ S _t < 2800	+0.132547	+ 79
	2800 ≤ S _t	+0.689281	-1268
6	806 ≤ S _t < 900	+0.999208	- 598
	900 ≤ S _t < 2400	+0.364571	- 127
	2400 ≤ S _t	+0.845764	-1456
7	992 ≤ S _t < 2650	+0.191279	+ 26
	2650 ≤ S _t	+0.959904	-1941
8	1026 ≤ S _t < 1026	+0.001484	+ 291
	2400 ≤ S _t	+0.970399	-2004
9	1158 ≤ S _t < 2800	-0.003418	+ 303
	2800 ≤ S _t	+0.998617	-2382
10	695 ≤ S _t < 1700	+0.299939	- 112
	1700 ≤ S _t < 2700	+0.005906	+ 276
	2700 ≤ S _t	+1.009896	-2412
11	724 ≤ S _t < 1400	+0.236047	- 45
	1400 ≤ S _t < 2700	+0.007889	+ 263
	2700 ≤ S _t	+0.986707	-2351
12	697 ≤ S _t < 1400	+0.346955	- 142
	1400 ≤ S _t < 2700	+0.005623	+ 278
	2700 ≤ S _t	+0.951118	-2251

* ($\hat{Q}_{2t} = a_t S_t + b_t$, $S_t = X_t + I_{1t} + I_{2t}$)

된다. 그림-3은 충주 조정지댐을 기준으로 하여 본댐 및 조정지댐의 방류량을 결정할 수 있는 표-3의 Rule Curve 식에 의거 월별 가용 유량의 配分圖를 나타내며, 이 배분도를 이용하여 방류량을 결정할 때에는 Rule Curve식 적용을 위한 변곡점은 본댐의 월초 저류

량과 본댐 및 조정지댐에 유입하는 월간 유입량에 따라 결정된다.

표-3의 Rule Curve 식과 그림-3의 가용유량 배분도를 사용하여 댐 방류량을 결정할 때에는 해당월의 可用流量이 Zone-3에 있다고 판단될 경우에는 저수지의 저류 상태나 예상 유입량의 크기에 관계없이 거의 일정한 양으로 방류하면서 수력 발전과 용수공급을 수행하지만, 可用流量이 Zone-2로 내려가면 향후의 안정적인 용수 공급이나 수력 발전을 위해 물 공급 목표값에 대하여 線型으로 줄여 물을 사용하면서 Zone-3에 복귀하도록 하여야 한다. 또한 가용유량이 Zone-4에 있을 경우에는 발생할지도 모를 餘水路 방류량을 방지하기 위해서 첨두 발전 소요량 이상으로 물을 방류하여 수력 발전을 증대시키면서 Zone-3에 復歸하도록 制御하여야 하나 可用流量이 Zone-1에 있을 경우에는 극심한 한발에 따라 하류 방류량의 중단이 거의 불가피하여 진다. 개발된 운영율의 개념은 가용 유량이 가급적 Zone-3에 유지하도록 하여야 하며 可用流量이 Zone-3에 있을 경우는 저류량이나 유입량에 관계없이 방류량을 가급적 일정하게 유지하는 것을 의미하며, 이는 하류 용수 수요나 첨두 발전 수요의 유량만을 방류하여 저수지 수위를 가급적 높게 유지하여 발전 편익과 신뢰도를 증대시킬 수 있는 운영을 의미한다고 볼 수 있다.

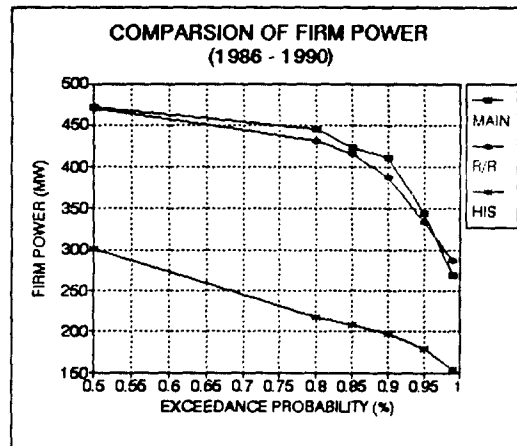
개발된 운영율의 사용을 위하여는 월초 저류상태가 그림-2의 저류량 배분도에 있어 시스템에 부여한 지정된 신뢰도 범위 이내일 때에는 본댐 및 조정지댐의 월간 예상 유입량에 따라 개발된 그림-3과 같은 可用流量 배분도에 의거, 표-2 또는 표-3의 Rule Curve 식을 이용하여 방류량을 결정하며, 월간 유입량 실적이나 조정된 예상 유입량에 따라 매일 (또는 적절한 기간 마다) Feed Back 하면서 월간 방류량을 조정한다. 그러나 저류 상태가 시스템에 부여한 신뢰도 범위 밖에 있을 경우에는 Rule Curve에 의해서 산정한 값보다 방류량을 증가시키거나 감소시키면서 본댐 저류량이 신뢰도 범위내에 복귀하도록 하여야만 기대 편익을 증대시킬 수 있다. 아울러 방류량의 조정에 있어서는 하류의 용수 수요량에 대처하면서 유입량의 濁水 분석이나 용수공급 및 여수로 방류량 등의 확률 분석 결과를 고려하여야 한다.

4.3 運營律의 檢證

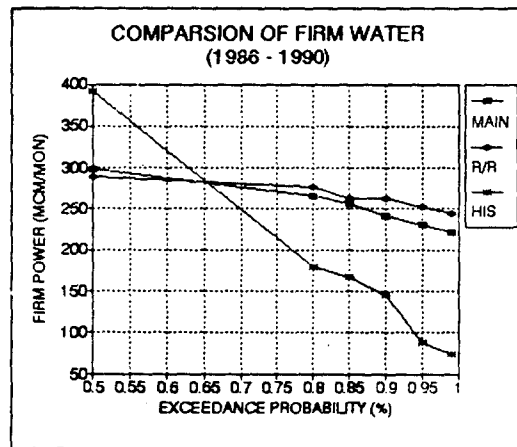
충주 다목적 시스템 운영을 위해 개발된 2가지 형태

Table-4 Comparison of the Simulations with Historical Results

Items	Historical Results	Simulation Rule A	Simulation Rule B
Annual Energy (GWH)	841.7	913.8	931.2
90% Firm Energy (GWH/Mon)	23.4	39.9	38.2
90% Firm Power (MW)	198.0	411.0	387.8
90% Firm Flow (MCM/Mon)	145.2	240.6	263.0



(a) Firm Power



(b) Firm Water Supply

Figure-4 Comparison of Firmness with Historical Results

의 운영율에 대한 효율성을 검증하기 위하여 운영율에 따른 모의 운영을 실시하였다. 모의 운영은 충주댐 사업이 완료된 직후인 1986년부터 1990년까지 5년 동안의 유입량 자료를 이용하였으며, 표-4 및 그림-4에는 과거 운영 실적과의 비교 결과가 나타나 있다. 여기서 운영율A는 본댐을 기준으로 한 경우이며, 운영율B는 조정지댐을 기준으로 한 경우이다.

이 표와 그림에서 알 수 있듯이 새로 개발된 운영율을 사용할 경우 시스템에서의 수력 에너지 생산을 증대시킬 수 있을 뿐 아니라 보장 용수 공급량 및 보장 출력도 증대시킬 수 있어 시스템 기능의 信賴性을 증대시킬 수 있을 것이다. 표-4에서 개발된 운영율에 따른 연간 발전량이 충주 시스템의 기본계획시 고려했던 연평균 발전량 844.1GWH 보다 크게 나타난 것은 충주댐 준공후 多雨年이 많이 포함되어 있어 유입량이 연평균값 보다 크기 때문이다. 또한 운영율을 사용할 경우에는 과거 운영 실적에 비해 8~10%의 전력을 더 생산할 수 있는 것으로 나타나지만 모형에 직접 고려할 수 없는 전력 생산과 밀접한 관련이 있는 한국 전력 공사나 하천 유지 용수 사용에 따른 지방 자치 단체와의 관계 등을 고려하면 효율성은 다소 저하될 것이다. 그러나 개발된 운영율을 사용하게 되면 전력이나 용수 공급 등의 편익을 증대시키면서 신뢰성을 증대시킬 수 있다는 것은 이 표로 부터 분명하게 알 수 있다.

5. 結 論

이번 연구에서는 저수지 운영의 放流量 결정을 위한 의사결정에 있어 시스템 기술자에게 信賴度(또는 危險度)를 제시하면서 저수지의 저류 상태와 당해월 유입량에 따라 다목적 저수지 시스템으로 부터 기대 편익을 증대시킬 수 있는 運營律을 제시하였다. 운영율은 장기간의 최적 운영 결과에 따라 도출된 월별 방류량을 결정할 수 있는 Rule Curve 식과 신뢰도 수준에 따른 저수용량의 월별 배분이다. 이러한 운영율 개념을 忠州 다목적 저수지 시스템에 적용하였으며, 장기 예측 불가능한 不確實性의 저수지 유입량을 고려하면서 다목적 저수지의 각 목적을 증대시키고 시스템에 부여된 신뢰도 범위를 수용하면서 방류 정책을 쉽게 결정할 수 있도록 하였다.

본 技法은 단일 저수지 시스템의 운영율 뿐 아니라 수계내의 여러 저수지를 동시에 고려하여 연계 최적

운영 결과에 따라 신뢰도 분석 및 Rule Curve의 개발에 적용할 수 있다. 그러나 수계내의 여러 저수지를 동시에 고려할 때에는 장기간의 자료에 의한 한 개의 時系列로 연계 최적 운영할 수 있는 보다 효율적인 최적화 기법의 도입이 필요하다.

參 考 文 獻

1. Askew, A. J.,(1974) "Optimum Reservoir Operating Policies and the Imposition of a Reliability Constraint", Water Resources Research, Vol. 10, No.1, pp. 51-56.
2. Chung, F. L., S. K. Arora, and M. C. Archer, (1988) "Stochastic Evaluation of Reservoir Operation Rules", Proceedings of the 3rd Water Resources Operations Management Workshop, Sponsored by the Water Resources Planning and Management Division, ASCE, Edited by J. W. Labadie et al.
3. Ford, D. T., R. Garland, and C. Sullivan, (1981) "Operation Policy Analysis: Sam Rayburn Reservoir", Technical Paper No. 85, The Hydrologic Engineering Center, US Army Corps of Engineers.
4. Haimes, Y. Y., D. A. Wismer, and L. S. Larsdon, (1971) "On Bicriterion Formulation of Integrated System Identification and System Optimization", IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-1, pp. 296-297.
5. Karamouz, M. K. and M. H. Houck, (1987) "Comparison of Stochastic and Deterministic Dynamic Programming for Reservoir Operating Rule Generation", Water Resources Bulletin, Vol. 23, No. 1, pp. 1-9.
6. Ko, S. K., (1989) "Optimizing Reservoir Systems Operation with Multiobjective Decision Analysis," Dissertation submitted for the Degree of Doctor of Philosophy, Colorado State University, Fort Collins, CO.
7. ReVelle, C. E. Joeres, and W. Kirby, (1969) "The Linear Decision Rule in Reservoir Management and Design 1. Development of the Stochastic Model", Water Resources Research, Vol. 5, No. 4, pp. 767-777.
8. Young, G. K., (1967) "Finding Reservoir Operating Rules", Journal of the Hydraulics Division, Proceedings of the American Society of Civil Engineers, HY 6, pp. 297-321.
9. Zadeh, L. A., (1963) "Optimality and Non-Scalar-Valued Performance Criteria", IEEE Transactions on Automatic Control, AC-8, No. 1, pp. 59-60.
10. 高錫九, (1986) "貯水池 시스템 運營 效率化를 위한 運營 基準 導出에 관한 研究", 제7회 댐건설 및 기술 세미나 논문집, 한국대댐학회.
11. 高錫九, (1990) "信賴度를 고려한 漢江水系 貯水池群의 最適 運營", 제10회 韓國 大댐학회 학술발표회 논문집, 한국대댐학회.
12. 權五憲, 김건중, (1986). "漢江水系 昭陽江 및 忠州 多目的 貯水池 最適 連繫 運營 方案 研究 (2차)", 産業基地開發公社 / 維新設計公園.
13. 李熙昇, (1991) "信賴度를 고려한 貯水池의 月別 運營律 開發, 忠北大學校 大學院 碩士 學位 論文.